

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

Departamento de Física



**Modelos de cálculo para o isolamento sonoro a sons de condução aérea
entre compartimentos**

Gustavo Manuel Rangel da Silva Pires

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia Física

2012

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

Departamento de Física



**Modelos de cálculo para o isolamento sonoro a sons de condução aérea
entre compartimentos**

Gustavo Manuel Rangel da Silva Pires

Dissertação

Orientadores:

Professor Doutor José Luís Bento Coelho

Professora Doutora Maria Margarida da Fonseca Beja Godinho

Mestrado Integrado em Engenharia Física

2012

ÍNDICE

RESUMO	6
ABSTRACT	8
AGRADECIMENTOS	10
1. CONSIDERAÇÕES GERAIS E OBJECTIVO.....	11
2. CONCEITOS BASE DE ACÚSTICA	13
2.1. Campos sonoros	13
2.2. Pressão sonora eficaz.....	16
2.3. Audição humana.....	17
2.4. Bandas de frequência	18
2.5. Nível de pressão sonora	20
2.6. Ondas sonoras em meios fluidos isotrópicos e não dissipativos	21
2.6.1. Equação de onda	21
2.6.2. Ondas planas	23
2.6.3. Ondas esféricas	23
2.6.4. Impedância acústica do meio.....	25
2.7. Intensidade e potência sonora	27
2.7.1. Ondas planas	27
2.7.2. Ondas esféricas	30
2.8. Dissipação de energia durante o processo de propagação sonora	30
2.9. Ondas sonoras em meios sólidos	32
2.9.1. Ondas longitudinais.....	32
2.9.2. Ondas transversais ou de corte	33
2.9.3. Ondas de flexão	33
2.10. Fontes sonoras	35
2.10.1. Exemplo do monopólio.....	36
2.11. Radiação sonora a partir de elementos de construção	38
2.11.1. Factor de radiação sonora	38
3. ACÚSTICA DE ESPAÇOS FECHADOS.....	40
3.1. Campos sonoros	40
3.2. Modelo do campo difuso	42
3.3. Tempos de reverberação	43

3.4.	Isolamento sonoro a sons de condução aérea	44
3.4.1.	Parâmetros legais	44
3.4.2.	Coeficiente de transmissão sonora	45
3.4.3.	Índice de redução sonora	46
3.4.4.	Índice de redução sonora aparente	51
3.4.5.	Índice de isolamento sonoro sons de condução aérea	53
3.4.6.	Relação entre D_{nT} e R'	53
3.4.7.	Valor único do isolamento sonoro a sons de condução aérea	54
4.	MODELOS DE CÁLCULO DE R'	58
4.1.	Princípios Gerais	58
4.2.	Transmissão sonora por via estrutural	61
4.2.1.	Modelo de cálculo detalhado	62
4.2.2.	Modelo de cálculo simplificado	72
5.	OBTENÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA	75
5.1.	Índice de redução sonora para elementos homogéneos	75
5.1.1.	Modelo de cálculo detalhado	75
5.1.2.	Modelo de cálculo simplificado	78
5.2.	Cálculo do acréscimo de isolamento sonoro devido à introdução de revestimentos adicionais	78
5.3.	Tempos de reverberação estrutural	81
5.3.1.	Valores <i>in situ</i>	81
5.3.2.	Valores de laboratório	82
5.4.	Índice de redução da transmissão de vibração	82
6.	VALIDAÇÃO DAS FOLHAS DE CÁLCULO	86
6.1.	Folha com o modelo de cálculo detalhado	86
6.2.	Modelo de cálculo simplificado	89
7.	APLICAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO A SITUAÇÕES REAIS	91
7.1.	Compartimentos de igual dimensão - transmissão marginal relevante	91
7.2.	Compartimentos de igual dimensão - transmissão marginal desprezável	91
7.3.	Compartimentos de igual dimensão - elemento de separação duplo	91
7.4.	Compartimentos de dimensão diferente - parcialmente sobrepostos	91
	CONCLUSÕES	91
	REFERÊNCIAS	91

BIBLIOGRAFIA.....	91
ANEXOS.....	91
A.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	91

RESUMO

O projecto de acústica de um edifício tem como objectivos primordiais dotar o edifício com características de qualidade acústica, garantindo um elevado conforto acústico para os seus utentes e minimizando os impactes resultantes das emissões sonoras dos equipamentos ruidosos a instalar.

Em Portugal, os requisitos acústicos aplicáveis aos edifícios constam do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), Anexo ao Decreto-Lei n.º 129/2002 de 11 de Maio, com alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho.

Este documento estabelece um conjunto de critérios aplicáveis ao isolamento sonoro, ao tempo de reverberação e ao ruído emitido por equipamentos colectivos no interior dos edifícios com vista a melhorar as condições de qualidade acústica do edificado.

Relativamente ao isolamento sonoro entre compartimentos, para efeitos de estabelecimento de condições suficientes de controlo de transmissão sonora entre diferentes compartimentos, o RRAE apoia-se no valor do índice de isolamento a sons de condução aérea.

A tendência crescente para a profusão de equipamentos ruidosos instalados na generalidade dos edifícios (tais como os de limpeza, confecção de alimentos, ventilação e condicionamento do ar, entretenimento, entre outros), associada à pretensão por parte dos moradores que ao elevado investimento na aquisição da habitação corresponda um grau de privacidade e sossego adequado, tem levado a uma maior exigência para que o isolamento sonoro proporcionado pelas soluções de separação entre espaços esteja de acordo com, pelo menos, o legalmente exigido.

Assim, de forma a evitar correções muitas vezes dispendiosas após o edifício estar concluído e ocupado, é fundamental que em fase de projecto os índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos sejam estimados adequadamente.

Torna-se portanto evidente a importância de possuir ferramentas de cálculo de acordo com métodos normalizados que, de uma forma expedita, permitam estimar o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos.

A presente dissertação pretende: i) apresentar os conceitos base de acústica que se julgam fundamentais para a compreensão e aplicação do modelo de cálculo de isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos; ii) detalhar os modelos de cálculo normalizados; iii) construir folhas de cálculo de modo a tornar expeditos os modelos de cálculo normalizados; iv) analisar a aplicabilidade dos modelos a situações reais.

ABSTRACT

The acoustics project of a building has the main objective of provide the building with features of acoustic quality, ensuring a high acoustic comfort for its users and minimizing the impacts resulting from the noise emitted by noisy equipments installed in the building.

In Portugal, the acoustic requirements applicable to buildings are contained in the "Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios" (RRAE), annex to Portuguese law - D.L 96/2008 of 9 June.

This document, in order to improve the acoustics of the building, provides a set of acoustic criteria for the sound insulation, reverberation time and noise emitted by collective equipment inside buildings.

For the airborne sound insulation between compartments, in order to establish conditions sufficient for the control of the sound transmission between compartments, the RRAE considers the standardized level difference (D_nT).

The growing trend towards the proliferation of noisy equipment installed in most buildings (such as cleaning equipments, food preparation, ventilation and air conditioning, entertainment, etc.) associated with the residents expectation that the high investment in the housing acquisition gives rise to a corresponding degree of acoustic comfort and of privacy, has led to greater requirement that the sound insulation granted by the solutions utilized in spaces separation is in accordance with, at least, the legally required.

Thus during the project it is essential to properly estimate the airborne sound insulation between compartments in order to avoid costly fixes after the building is completed and occupied.

It is therefore evident the importance of having calculation tools according to standardized methods, to estimate the airborne sound insulation between compartments.

This dissertation aims: i) to present the basic concepts of acoustics that are judged critical to the understanding and application of the airborne sound insulation calculation models; ii) to

detail the standardized calculation models; iii) to build up spreadsheets in accordance with the standardized calculation models in order to get proper tools that allow us to easily estimate the airborne sound insulation between compartments and iv) to examine the applicability of the standardized models in real situations.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi tornado possível graças ao apoio do Professor Bento Coelho e da Professora Margarida Godinho. Aproveito este capítulo para expressar a ambos o meu sincero agradecimento.

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS E OBJECTIVO

O projecto de acústica de um edifício tem como objectivos primordiais dotar o edifício com características de qualidade acústica, garantindo um elevado conforto acústico para os seus utentes e minimizando os impactes resultantes das emissões sonoras dos equipamentos ruidosos a instalar.

Em Portugal, os requisitos acústicos aplicáveis aos edifícios constam do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), Anexo ao Decreto-Lei n.º 129/2002 de 11 de Maio, com alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 96/2008 de 9 de Junho.

Este documento estabelece um conjunto de critérios aplicáveis ao isolamento sonoro, ao tempo de reverberação e ao ruído emitido por equipamentos colectivos no interior dos edifícios com vista a melhorar as condições de qualidade acústica do edificado.

Relativamente ao isolamento sonoro entre compartimentos, para efeitos de estabelecimento de condições suficientes de controlo de transmissão sonora entre diferentes compartimentos, o RRAE apoia-se no valor do índice de isolamento a sons de condução aérea.

A tendência crescente para a profusão de equipamentos ruidosos instalados na generalidade dos edifícios (tais como os de limpeza, confecção de alimentos, ventilação e condicionamento do ar, entretenimento, entre outros), associada à pretensão por parte dos moradores que ao elevado investimento na aquisição da habitação corresponda um grau de privacidade e sossego adequado, tem levado a uma maior exigência para que o isolamento sonoro proporcionado pelas soluções de separação entre espaços esteja de acordo com, pelo menos, o legalmente exigido.

Os requisitos de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos impostos pelo RRAE são diferenciados em função do tipo de espaços e respectivas confrontações.

No caso de edifícios de habitação, os requisitos são, por exemplo, de 50 dB entre fogos, e de 58 dB entre fogos e outros espaços onde se desenvolvam actividades ruidosas, tais

como comércio, indústria ou serviços, sendo que no caso de estabelecimentos inseridos em edifícios mistos nos quais os níveis sonoros gerados são muito elevados (bares, discotecas, gráficas, padarias com fabrico próprio, etc.), o valor de 58 dB torna-se insuficiente para conter a transmissão do ruído para os espaços habitados dentro dos limiares admissíveis no Regulamento Geral do Ruído, sendo necessário adoptar soluções que garantam índices de isolamento superiores. Já para as salas de cinema, os requisitos de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos tornam-se mais exigentes, apresentando valores de 65 dB.

De forma a garantir o cumprimento desta variedade de requisitos e evitar correções muitas vezes dispendiosas após o edifício estar concluído e ocupado, é fundamental que em fase de projecto os índices de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos sejam estimados adequadamente.

Torna-se portanto evidente a importância de possuir ferramentas de cálculo de acordo com métodos normalizados que, de uma forma expedita, permitam estimar o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos.

O objectivo da presente dissertação é o de: i) apresentar os conceitos base de acústica que se julgam fundamentais para a compreensão e aplicação do modelo de cálculo de isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos; ii) detalhar os modelos de cálculo normalizados; iii) construir folhas de cálculo de modo a tornar expeditos os modelos de cálculo normalizados; iv) analisar a aplicabilidade dos modelos a situações reais.

2. CONCEITOS BASE DE ACÚSTICA

O presente capítulo pretende introduzir alguns conceitos de acústica que se julgam fundamentais para a compreensão e aplicação do modelo de cálculo de isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos.

Assim, serão abordados temas como: i) ondas sonoras em meios fluidos, propagação, equações de conservação; ii) conceitos de intensidade sonora e potência sonora (conceitos essenciais na caracterização de fontes sonoras); iii) fontes sonoras, processos de geração de ruído e o factor de radiação sonora; iv) ondas sonoras em meios sólidos, tipos de ondas sonoras e sua importância na transmissão de ruído entre compartimentos.

2.1. CAMPOS SONOROS

No processo de transmissão sonora entre compartimentos, os sinais sonoros são produzidos essencialmente por sistemas vibratórios que introduzem alterações no meio onde ocorre a propagação.

No ar, um sistema ao vibrar pressiona as partículas de ar que lhes estão adjacentes transmitindo-lhes o seu movimento vibratório. Isto faz com que as partículas de ar adjacentes ao sistema fiquem a vibrar em torno de uma posição de equilíbrio.

A vibração é então passada de partícula em partícula através do mesmo processo, ou seja as partículas de ar que ficaram a vibrar pressionam consecutivamente as partículas de ar que lhes são adjacentes, fazendo com que estas também fiquem a vibrar em torno de uma posição de equilíbrio.

A propagação da vibração no espaço é assim efectuada sem deslocação das partículas, estas apenas vibram em torno de uma posição de equilíbrio originando um movimento ondulatório (onda sonora), ou seja, não há transferência de matéria apenas de energiaⁱ.

Este processo ocorre ao longo de todo o espaço, naturalmente com perdas associadas.

ⁱ Em pontos próximos de explosões pode ocorrer transferência de matéria.

A Figura 2.1ⁱⁱ apresenta um esquema representativo da transmissão de vibração entre partículas de ar adjacentes, mostra ainda a variação temporal do movimento ondulatório gerado.

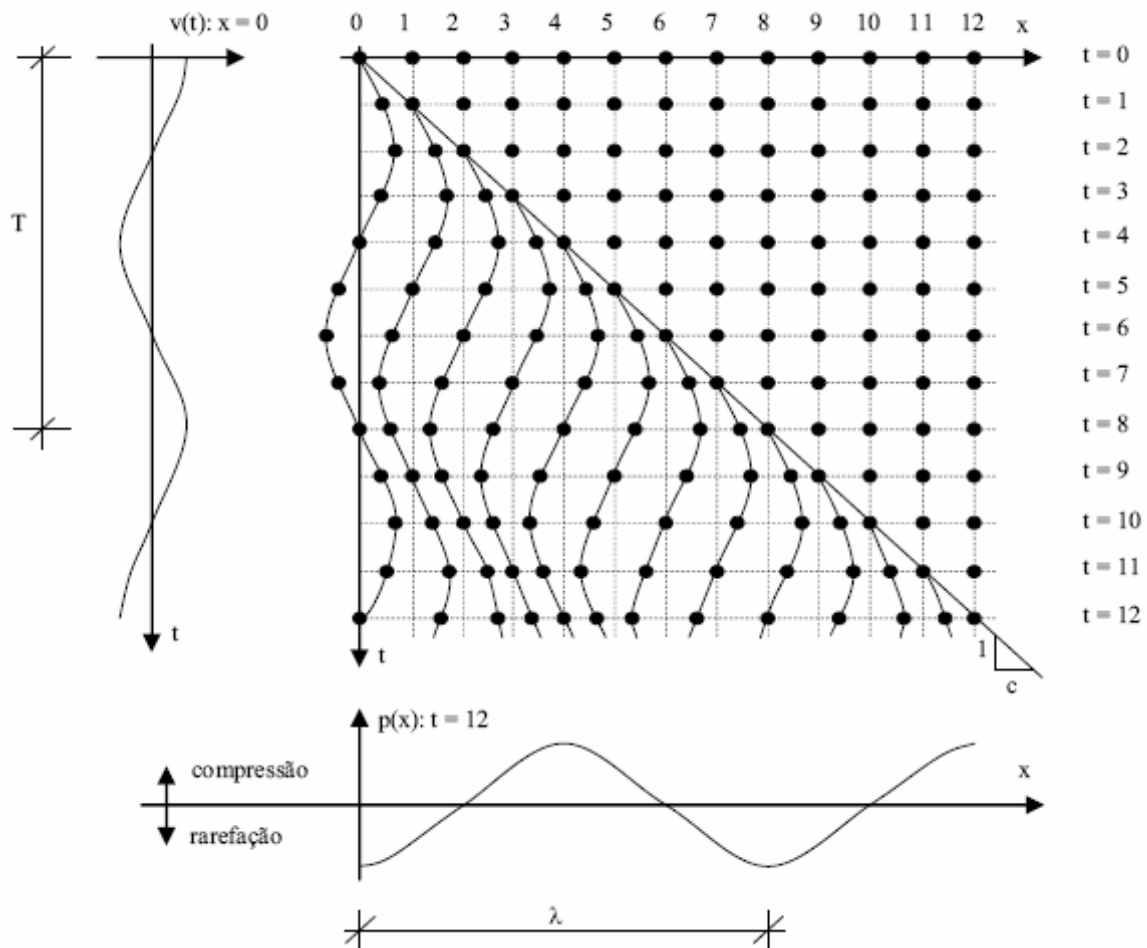


Figura 2.1 Esquema representativo da transmissão de vibração entre partículas de ar adjacentes

Com:

- $v(t)$ Velocidade das partículas (m/s).
- T Período de vibração (s).
- λ Comprimento de onda (m).

ⁱⁱ Figura retirada de [ref. 1].

O período do sinal, T , corresponde ao tempo mínimo que demora determinada partícula de ar a repetir as suas características de grandeza, direcção e posição. Para o caso da Figura 2.1 tem-se $T = 8$ s.

O comprimento de onda, λ , corresponde à distância mínima percorrida para que o período se repita. Para o caso da Figura 2.1 tem-se $\lambda = 8$.

Da observação da Figura 2.1 é possível verificar que a velocidade da partícula se encontra desfasada de $\pi/2$ em relação ao seu deslocamento.

Estas alterações no meio introduzidas pelo sistema vibratório provocam uma sequência de compressões e/ou rarefacções não estacionárias, originando variações espaciais e temporais da velocidade, pressão e densidade do ar em torno de valores de equilíbrio. Pode então escrever-se:

- Velocidade: $v_{Total} = V_0 + v$ (m/s) Equação 1

- Pressão: $P_{Total} = P_0 + p$ (N/m²) Equação 2

- Densidade: $\rho_{Total} = \rho_0 + \rho$ (kg/m³) Equação 3

Onde:

v_{Total} É a velocidade total das partículas no instante t (m/s).

v É a velocidade das partículas no instante t devido à perturbação provocada pela onda sonora (m/s).

V_0 É a velocidade das partículas no instante $t = 0$ (m/s).

P_{Total} É a pressão total no instante t (N/m²).

P É a pressão sonora no instante t devido à perturbação provocada pela onda sonora (N/m²).

P_0 É a pressão de equilíbrio do meio.

ρ_{Total} É a densidade total do meio no instante t (kg/m³).

ρ É a densidade do meio no instante t devido à perturbação provocada pela onda sonora (kg/m³).

ρ_0 É a densidade do meio em equilíbrio.

Relativamente ao valor instantâneo da pressão, no caso da propagação do som no ar, a pressão de equilíbrio corresponde ao valor da pressão atmosférica (ver Figura 2.2ⁱⁱⁱ).

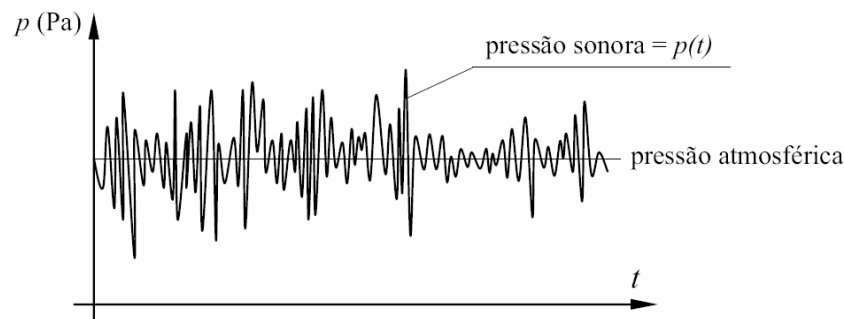


Figura 2.2 Variação da pressão sonora em torno da pressão de equilíbrio (pressão atmosférica).

Pode então definir-se a pressão sonora num determinado ponto e instante como:

$$P(t) = P_{Total}(t) - P_{atm} \text{ (N/m}^2\text{)} \text{ Equação 4}$$

onde :

P_{atm} É a pressão atmosférica ($P_{atm} \approx 10^5 \text{ N/m}^2$).

2.2. PRESSÃO SONORA EFICAZ

De um modo geral nas aplicações de engenharia acústica está-se interessado em analisar a influência das ondas sonoras no ser humano.

Ora, é sabido que o ouvido humano “capta” energia acústica e não pressões instantâneas, pelo que não é necessário conhecer-se a pressão em cada instante, mas antes um valor absoluto de oscilação entre dois instantes (pressão eficaz). Este valor é normalmente indicado pela raiz quadrada do valor quadrático médio da pressão, (valor RMS – *Root Mean Square* - correspondente ao valor máximo (em valor absoluto) alcançado pela pressão do ar entre dois instantes).

ⁱⁱⁱ Figura retirada de [ref. 1].

A pressão eficaz (P_{RMS}) é dada por:

$$P_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P^2(t) dt} \quad (\text{N/m}^2) \quad \text{Equação 5}$$

O valor quadrático da pressão eficaz relaciona-se com a energia acústica. Como referido o ouvido humano capta energia acústica, como tal utiliza-se P_{RMS}^2 e não P_{RMS} .

$$P_{RMS}^2 = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P^2(t) dt \quad (\text{N}^2/\text{m}^4) \quad \text{Equação 6}$$

Outra vantagem em se utilizar o valor de P_{RMS}^2 é a de que, pela sua relação directa com os efeitos provocados no ser humano, permite facilmente definir valores limites legais para por exemplo o ruído emitido por determinado tipo de máquina, ou mesmo o ruído ambiente exterior.

2.3. AUDIÇÃO HUMANA

Como referido em 2.2 o ouvido humano “capta” energia sonora e não pressão sonora instantânea, pelo que nas aplicações de acústica é utilizado o valor ao quadrado da pressão eficaz.

Acontece que nem todas as flutuações de pressão quando atingem o ouvido humano produzem sensação auditiva, ou seja nem todas as alterações introduzidas no ar pelo sistema vibratório resultam em sinais sonoros.

A sensação auditiva ocorre apenas quando a amplitude das flutuações de pressão e a taxa de variação em que ocorrem no domínio do tempo (frequência) estiverem dentro de certos limites.

No que se refere à frequência, o ouvido humano é capaz de captar flutuações de pressão eficaz em frequências situadas entre os 20 Hz e os 20 kHz. Desta forma os “sinais sonoros” com frequência inferiores a 20 Hz são designados por infra-sons, já os “sinais sonoros” com frequências superiores a 20 kHz são designados por ultra-sons.

A gama de frequências audível pode ser dividida em sons:

- Graves: $20 \text{ Hz} \leq f \leq 400 \text{ Hz}$
- Médios: $400 \text{ Hz} \leq f \leq 1600 \text{ Hz}$

- Agudos: $1600 \text{ Hz} \leq f \leq 20 \text{ kHz}$

Relativamente à amplitude da pressão sonora, para a gama de frequências onde a sensibilidade auditiva é maior, correspondente ao intervalo entre cerca dos 1000 Hz e os 4000 Hz, o ouvido humano capta pressões entre $20 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$, valor correspondente ao limiar de audição, e os 200 N/m^2 , valor já acima do valor correspondente ao limiar da dor (20 N/m^2).

2.4. BANDAS DE FREQUÊNCIA

Como referido em 2.3 a gama de frequências audíveis é bastante extensa, correspondendo à gama compreendida entre os 20 Hz e os 20 kHz. Na análise dos sinais sonoros torna-se mais prático a utilização de bandas de frequências constituídas por uma largura normalizada. As bandas de frequência são caracterizadas pelo valor central da frequência na largura total $[f_1, f_2]$.

Em acústica são então utilizados os filtros passa banda.

Os filtros passa banda, são filtros de largura percentual constante, ou seja, são filtros que apresentam uma escala logaritmica, sendo esta uma das razões pela qual os filtros passa banda são utilizados em acústica, pois o ouvido humano também apresenta um comportamento próximo da função logaritmica (distingue melhor alterações nas baixas frequências do que nas altas frequências).

O funcionamento de um filtro passa banda consiste em deixar passar uma certa gama de frequências e rejeitar (atenuar) todas as outras frequências que fiquem fora dessa gama.

Um filtro passa banda ideal apresenta uma banda passante totalmente plana (sem atenuação) e rejeita, corta, todas as frequências que se encontrem fora dessa banda.

Em acústica de edifícios são normalmente utilizados filtros de bandas de oitava^{iv} ou filtros de bandas de um terço de oitava.

^{iv} A designação de oitava é normalmente utilizada em música para relacionar a “distância” em frequência entre duas notas iguais consecutivas mas com frequência diferentes.

Os filtros de banda de oitava e os filtros de um terço de oitava caracterizam-se por apresentarem a seguinte relação entre f_1 e f_2 :

- Banda de oitava $f_2 = 2 \times f_1$ Equação 7
- Banda de um terço de oitava $f_2 = \sqrt[3]{2} f_1$ Equação 8

As frequências centrais dos filtros de oitava e dos filtros de um terço de oitava utilizadas em acústica de edifícios encontram-se na Tabela 2.1 seguinte.

Tabela 2.1 Frequências centrais dos filtros de oitava e dos filtros de um terço de oitava.

Frequências centrais (Hz)	
Bandas de oitava	Bandas de terços de oitava
125	100
	125
	160
250	200
	250
	315
500	400
	500
	630
1000	800
	1000
	1250
2000	1600
	2000
	2500
	3150

A utilização de filtros de um terço de oitava ou de filtros de oitava depende essencialmente do detalhe pretendido na análise do sinal.

Relativamente aos ensaios *in situ* para verificação do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos, os métodos normalizados impõem a utilização de bandas com largura de um terço de oitava.

2.5. NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

Como referido em 2.3 a gama de valores de pressão sonora audíveis é bastante extensa, correspondendo à gama compreendida entre os $20 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ e os 200 N/m^2 . Na análise dos sinais sonoros é conveniente converter esta gama de valores para uma escala mais comprimida.

Na medição das grandezas acústicas utiliza-se então uma escala logarítmica designada por escala dos decibéis^v.

O decibel (dB) é uma unidade logarítmica que indica a proporção de uma quantidade física em relação a um valor de referência.

Em acústica o dB é utilizado para quantificar, por exemplo, níveis de pressão sonora. Neste caso, o valor de pressão sonora de referência utilizado equivale ao limiar de audição, fazendo com que o nível sonoro mínimo audível corresponda aos 0 dB.

O nível de pressão sonora de um determinado sinal sonoro é então definido como:

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{P_{RMS}^2}{P_0^2} \right) \text{ (dB) Equação 9}$$

onde:

P_0 É o valor de referência da pressão sonora ($P_0 = 20 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$).

^v O nome desta unidade foi atribuído em honra a Alexander Graham Bell, inventor do telefone. Como a escala Bel na gama audível teria valores entre 0 e 1.40 B, por comodidade optou-se por multiplicar esses valores por dez, aparecendo portanto a unidade decibel (dB) com valores entre os 0 e os 140 dB.

2.6. ONDAS SONORAS EM MEIOS FLUIDOS ISOTRÓPICOS E NÃO DISSIPATIVOS^{vi}

2.6.1. Equação de onda

Em mecânica dos fluidos o meio fluído, gasoso ou líquido, por ser possível definir um elemento de volume de fluido de dimensões muito superiores às das moléculas constituintes do meio mas, no entanto, inferiores às dimensões das variáveis dos problemas considerados, é considerado como um meio contínuo.

O movimento do meio é descrito através das equações de conservação de massa, de conservação de momento e de conservação de energia do elemento de volume.

Em acústica de edifícios o fluido com interesse é normalmente o ar. Ora, como na atmosfera os números de *Reynolds* envolvidos no processo de propagação de som são geralmente muito elevados (da ordem de 10^8), ou seja as forças viscosas são muito pequenas quando comparadas com as forças de inércia pode-se considerar o meio como invíscido, ou seja sem perdas de energia interna devido a fricção ou arrasto do fluído.

Para além disso, como as perturbações induzidas no meio por uma onda sonora são muito pequenas, pode-se ainda considerar a presença do campo sonoro no ar como uma perturbação linear. Esta aproximação torna-se muito vantajosa pois permite utilizar apenas aproximações de primeira ordem na maioria dos problemas, ou seja, o produto de duas perturbações é desprezado e todas as equações que descrevem os movimentos são lineares. Concluindo-se assim que não existe interacção entre ondas sonoras distintas, ou seja os campos sonoros são simplesmente adicionados para obter o campo sonoro total.

Considerando todas estas aproximações, podem ser deduzidas^{vii} as equações fundamentais dos fluidos aplicadas à acústica: i) equação da conservação da massa, Equação 10; ii) equação da conservação do momento, Equação 11 e iii) equação que relaciona pressão e densidade, Equação 12.

^{vi} Na elaboração deste ponto e respetivos sub-pontos foram maioritariamente consultadas as referências: [ref. 2]; [ref. 3] e [ref. 4].

^{vii} Podem ser consultadas as referências [ref. 3] e [ref. 4] para obtenção das deduções.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \nabla v \quad \text{Equação 10}$$

$$\nabla P = -\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} \quad \text{Equação 11}$$

$$P = c^2 \rho \quad (\text{N/m}^2) \quad \text{Equação 12}$$

onde:

P É a pressão sonora no instante t devido à perturbação provocada pela onda sonora (N/m^2).

ρ É a densidade do meio no instante t devido à perturbação provocada pela onda sonora (kg/m^3).

ρ_0 É a densidade do meio em equilíbrio.

v É a velocidade das partículas no instante t devido à perturbação provocada pela onda sonora (m/s).

c É a velocidade do som no meio (m/s).

Resolvendo as equações em ordem a v e ρ , obtém-se a equação de onda, expressão geral que descreve a propagação de uma onda sonora num volume elementar do meio fluído:

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad \text{Equação 13}$$

Em que ∇^2 é o operador Laplaciano $\left(\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$.

As ondas planas e as ondas esféricas são duas soluções possíveis da equação de onda. Constituem-se como exemplos idealizados de tipos de ondas importantes não só em situações teóricas como igualmente em situações práticas (medições).

É de referir que as ondas planas, exemplo idealizado mais simples, são utilizadas seguidamente para se introduzir uma série de conceitos importantes em acústica, como seja o caso da impedância acústica ou da intensidade acústica.

2.6.2. Ondas planas

Como referido, a onda plana constitui-se como uma das soluções possíveis da equação de onda.

Caracteriza-se por ser função apenas de uma variável espacial, por este motivo é também por vezes designada por onda unidimensional.

Considerando uma onda plana a deslocar-se na direcção x , a equação de onda, Equação 13, fica:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad \text{Equação 14}$$

A solução geral da Equação 14 é dada por:

$$P(x,t) = f(x-ct) + g(x+ct) \quad \text{Equação 15}$$

Se admitirmos que f e g são harmónicas de frequência w , a solução geral para a pressão sonora de uma perturbação acústica plana pode ser dada por:

$$P(x,t) = Ae^{i(wt-kx)} + Be^{i(wt+kx)} \quad \text{Equação 16}$$

onde:

w Frequência angular, $w = \frac{2\pi}{T}$ (rad/s).

k É o número de onda, $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{w}{c}$ (m^{-1}).

λ É o comprimento de onda (m).

c Velocidade do som no meio (m/s).

2.6.3. Ondas esféricas

No caso das ondas esféricas em vez de se utilizar sistema cartesiano de coordenadas como no caso das ondas planas, torna-se naturalmente conveniente utilizar o sistema esférico de coordenadas.

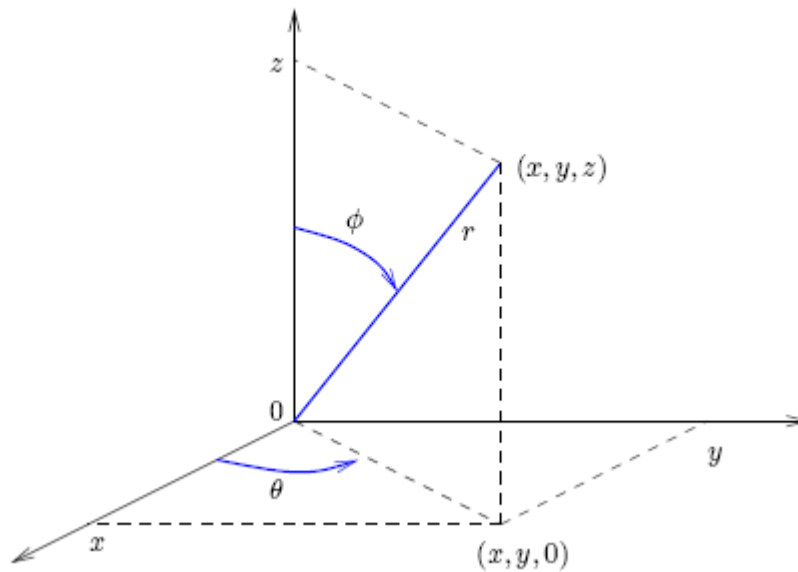


Figura 2.3 Sistema esférico de coordenadas.

Centrando a onda esférica na origem do referencial, a equação de onda, Equação 13, passa a depender apenas da distância radial r e do tempo:

$$\frac{\partial^2 (rP)}{\partial r^2} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 (rP)}{\partial t^2} = 0 \quad \text{Equação 17}$$

Analogamente às ondas planas, a solução geral da Equação 17 é dada por:

$$\begin{aligned} rP(r, t) &= f(r - ct) + g(r + ct) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow P(r, t) &= \frac{f(r - ct)}{r} + \frac{g(r + ct)}{r} \quad \text{Equação 18} \end{aligned}$$

Em que:

$$\frac{f(r - ct)}{r}$$

Define uma onda que radia para o infinito.

$$\frac{g(r + ct)}{r}$$

Define uma onda que converge para a origem.

A solução $\frac{g(r + ct)}{r}$ viola o princípio da causalidade pois trata-se de uma onda que foi criada no infinito, o que implicaria que a informação da actividade da fonte estaria contida em ondas anteriores ao tempo presente.

Desta forma a solução $\frac{g(r+ct)}{r}$ é excluída.

Temos então que a solução para uma onda esférica a propagar-se a partir do centro do referencial ($r = 0$) é dada por:

$$P(r,t) = \frac{\hat{P}}{r} e^{i(\omega t - kr)} \quad \text{Equação 19}$$

Com P complexo.

2.6.4. Impedância acústica do meio

2.6.4.1. Onda Plana

Considerando uma onda plana a deslocar-se na direcção positiva de x , fica-se com:

$$P(x,t) = f(x-ct) \quad \text{Equação 20}$$

Substituindo Equação 20 na Equação 12 ficamos com:

$$P = c^2 \rho \Leftrightarrow \rho = \frac{P}{c^2} \Leftrightarrow$$

$$\rho = \frac{f(x-ct)}{c^2} \quad \text{Equação 21}$$

Derivando a Equação 21 em ordem ao tempo, obtém-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial f}{\partial t}(x-ct) \Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial(x-ct)}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial(x-ct)}(x-ct) \Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{c}{c^2} \frac{\partial f}{\partial(x-ct)}(x-ct) \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{1}{c} \frac{\partial f}{\partial(x-ct)}(x-ct) \quad \text{Equação 22}$$

Substituindo a Equação 22 na equação de conservação da massa, Equação 10, ficamos com:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \frac{\partial v}{\partial x} \Leftrightarrow -\rho_0 \frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{c} \frac{\partial f}{\partial(x-ct)}(x-ct) \Leftrightarrow \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\rho_0 c} \frac{\partial f}{\partial(x-ct)}(x-ct)$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\rho_0 c} \frac{\partial f}{\partial x}(x-ct) \frac{\partial x}{\partial(x-ct)} \Leftrightarrow$$

$$\frac{\partial x}{\partial(x-ct)} = 1, \text{ pelo que}$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\rho_0 c} \frac{\partial f}{\partial x}(x - ct)$$

$$f(x-ct) = P(x,t), \text{ logo:}$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\rho_0 c} \frac{\partial P}{\partial x} \Rightarrow \int \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{1}{\rho_0 c} \int \frac{\partial P}{\partial x}$$

Obtemos finalmente a

Equação 23 que indica a velocidade a que as moléculas vibram com a passagem da onda sonora.

$$\Rightarrow v = \frac{P}{\rho_0 c} \text{ (m/s)}$$

Equação 23

Verifica-se assim que é possível relacionar a pressão sonora com a velocidade a que as partículas vibram a partir de:

$$P = \rho_0 c \times v \text{ (N/m}^2\text{)} \text{ Equação 24}$$

A grandeza $\rho_0 c$, que relaciona a pressão com a velocidade das partículas, é um indicador da resistência que o meio oferece ao movimento das partículas quando aplicada determinada pressão.

Esta grandeza é designada por impedância acústica (analogia com a impedância eléctrica, pressão \Leftrightarrow potencial eléctrico, velocidade \Leftrightarrow intensidade de corrente), e costuma ser referida pela letra z :

$$z = \rho_0 c \text{ Equação 25}$$

Em que:

ρ_0 É a densidade específica do meio (kg/m³)

c É a velocidade de propagação do som no meio (m/s)

2.6.4.2. Onda Esférica

Ao contrário das ondas planas, a impedância acústica do meio para uma onda esférica não é constante, depende da razão entre o comprimento de onda e a distância r à fonte.

Utilizando Equação 19 e a Equação 11 é possível demonstrar que para as ondas esféricas a impedância do meio é igual a:

$$z = \rho_0 c \frac{ikr}{1 + ikr} \text{ Equação 26}$$

Verifica-se que existe uma diferença de fase entre a pressão sonora e a velocidade das partículas. No entanto para distâncias r à fonte muito superiores ao comprimento de onda, ou seja, para valores de $\frac{2\pi}{\lambda} r \gg 1$, ficamos com:

$$z \approx \rho_0 c \text{ Equação 27}$$

Pelo que, nestas condições, a pressão sonora e a velocidade encontram-se praticamente em fase e a onda esférica comporta-se como uma onda plana.

2.7. INTENSIDADE E POTÊNCIA SONORA ^{viii}

A propagação de uma onda sonora envolve o transporta energia. Os pontos seguintes apresentam, para as ondas planas e para as ondas esféricas, as equações que descrevem a intensidade sonora (energia sonora total que atravessa uma dada área unitária) bem como a potência sonora.

2.7.1. Ondas planas

Considerando uma onda plana, uni dimensional, é possível efectuar o estudo energético da perturbação acústica uni-dimensional.

Para uma onda plana unidimensional a deslocar-se na direcção x , a equação da conservação da massa vem:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow c^2 \rho \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 c^2 \rho \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \text{ Equação 28}$$

Substituindo na Equação 28 as relações:

$$\rho \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial \rho^2}{\partial t} \text{ Equação 29}$$

$$P = c^2 \rho \text{ (N/m}^2\text{)} \text{ Equação 30}$$

Ficamos com:

^{viii} Na elaboração deste ponto e respetivos sub-pontos foi maioritariamente consultada a referência [ref. 2].

$$c^2 \rho \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 c^2 \rho \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow c^2 \frac{1}{2} \frac{\partial \rho^2}{\partial t} + \rho_0 P \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{c^2}{\rho_0} \frac{1}{2} \frac{\partial \rho^2}{\partial t} + P \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \text{ Equação 31}$$

Aplicando os mesmos passos na equação de conservação do momento:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} \text{ Equação 32}$$

Ficamos com:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \rho_0 v \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \text{ Equação 33}$$

Substituindo na Equação 33 a equação:

$$v \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\partial v^2}{\partial t} \text{ Equação 34}$$

Ficamos com:

$$\frac{1}{2} \rho_0 v \frac{\partial v^2}{\partial t} + v \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \text{ Equação 35}$$

Adicionando a Equação 31 com a Equação 35, ficamos com:

$$\frac{c^2}{\rho_0} \frac{1}{2} \frac{\partial \rho^2}{\partial t} + P \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{2} \rho_0 v \frac{\partial v^2}{\partial t} + v \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \text{ Equação 36}$$

Lembrando as propriedades das derivadas:

$$f' + g' = (f + g)' \text{ Equação 37}$$

$$fg' + gf' = (fg)' \text{ Equação 38}$$

Ficamos com:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \frac{c^2}{\rho_0} \rho^2 + \frac{1}{2} \rho_0 v^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x} (Pv) = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \frac{c^2}{\rho_0} \rho^2 + \frac{1}{2} \rho_0 v^2 \right) = -\frac{\partial}{\partial x} (Pv) \text{ Equação 39}$$

Integrando x no volume de comprimento l e secção transversal A ficamos com:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{x_0}^{x_0+l} A \left(\frac{1}{2} \frac{c^2}{\rho_0} \rho^2 + \frac{1}{2} \rho_0 v^2 \right) dx = -A [Pv]_{x_0}^{x_0+l} \text{ Equação 40}$$

Da Equação 40 é possível identificar os termos respeitantes à energia cinética e potencial devido à passagem da onda sonora no meio:

$$\text{Energia cinética: } T = \frac{1}{2} \frac{c^2}{\rho_0} \rho^2 \text{ (J/m}^3\text{)}$$

Energia Potencial: $U = \frac{1}{2} \rho_0 v^2 \text{ (J/m}^3\text{)}$

Já o termo da direita corresponde à variação do trabalho efectuado pela pressão P no exterior da superfície do volume de comprimento l e secção transversal A .

Podemos então escrever:

$$\frac{\partial}{\partial t}(T + U) = \frac{\partial}{\partial x}(Pv) \text{ Equação 41}$$

É então possível definir intensidade sonora como sendo a energia sonora total (cinética mais potencial) que atravessa uma dada área unitária.

Com base na Equação 41, verifica-se que então a intensidade sonora é dada por:

$$I = Pv \text{ (W/m}^2\text{)} \text{ Equação 42}$$

Considerando a Equação 24 e a Equação 25 podemos escrever ainda:

$$I = \frac{P^2}{z} \text{ (W/m}^2\text{)} \text{ Equação 43}$$

Podemos então passar a caracterizar a onda sonora pela sua energia, definindo-se assim o nível de intensidade sonora como:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ (dB)} \text{ Equação 44}$$

onde:

I É a intensidade média da onda sonora (W/m²)

I_0 É o valor de referência para a intensidade (semelhante a P_0), $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

A potência sonora de uma determinada fonte pode ser determinada a partir o integral do produto da intensidade sonora sobre uma qualquer superfície que envolva a referida fonte sonora.

$$W = \oint I_T \cdot n \cdot dS \text{ (W)} \text{ Equação 45}$$

com:

I_T Intensidade sonora segundo a normal à superfície.

n O vector normal à superfície.

dS Elemento da superfície total S .

2.7.2. Ondas esféricas

Como referido em 2.6.4.2, pode-se escrever a impedância acústica de uma onda esférica como:

$$z = \rho_0 c \frac{ikr}{1 + ikr} \quad z = \rho_0 c \frac{ikr(1 - ikr)}{(1 + ikr)(1 - ikr)} \Leftrightarrow z = \rho_0 c \frac{k^2 r^2 + ikr}{1 + k^2 r^2} \quad \text{Equação 46}$$

Para uma onda esférica do tipo harmónica a intensidade sonora é dada por:

$$I = \frac{P_{rms}^2}{\rho_0 c_0} \quad (\text{W/m}^2) \quad \text{Equação 47}$$

Já a potência sonora é dada por:

$$W = I \times S \Leftrightarrow W = I \times 4\pi r^2 \quad (\text{W}) \quad \text{Equação 48}$$

Com S igual à área da esfera e r igual ao raio da esfera.

2.8. DISSIPACÃO DE ENERGIA DURANTE O PROCESSO DE PROPAGAÇÃO SONORA

Nos pontos 2.6 e 2.7, verificou-se que para as ondas planas a intensidade sonora é dada por:

$$I = \frac{P^2}{z} \quad \text{Equação 49}$$

O que significa que, quando não é considerada qualquer dissipação de energia e no caso de ondas planas, a intensidade sonora mantém-se constante.

Relativamente às ondas esféricas, a Figura 2.4 permite facilmente concluir que a intensidade sonora decresce segundo o factor de $1/r^2$ (área da esfera).

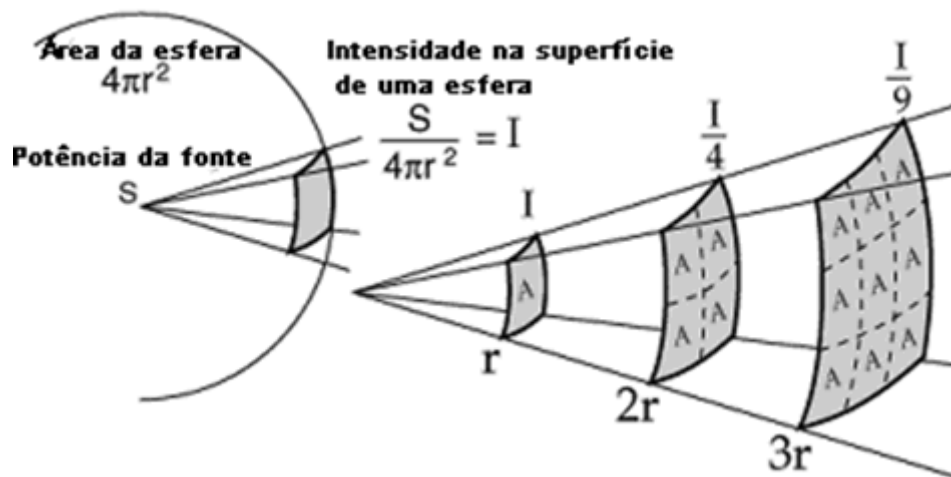


Figura 2.4 Ondas esféricas – atenuação com a distância.

Em condições reais de propagação sonora ocorrem, naturalmente, processos de dissipação de energia que não estão contabilizados nos modelos apresentados anteriormente.

Para a propagação sonora no exterior, costuma ser utilizado um método de engenharia que tem por base o método geral de cálculo constante da ISO 9613 [ref. 5].

Este método introduz na fórmula de cálculo um termo respeitante à atenuação sonora que ocorre durante a propagação da fonte sonora ao receptor.

O termo de atenuação, A , tem unidade de dB e pode ser calculado a partir de:

$$A = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{mis} \text{ (dB) Equação 50}$$

Em que:

A_{div} É a atenuação devida à divergência geométrica;

A_{atm} É a atenuação devida à absorção atmosférica;

A_{gr} É a atenuação devida ao efeito do solo;

A_{bar} É a atenuação devida a uma barreira;

A_{misc} É a atenuação devida a outros efeitos diversos, como por exemplo a propagação através da vegetação.

Os primeiros quatro termos de atenuação podem ser calculados a partir dos métodos gerais descritos na ISO 9613 [ref. 5]. Para o último termo, A_{mis} , a ISO 9613 [ref. 5] informa sobre três contribuições possíveis: i) atenuação devida à propagação através da vegetação; ii) atenuação em áreas industriais e iii) atenuação em áreas habitacionais.

2.9. ONDAS SONORAS EM MEIOS SÓLIDOS^{ix}

As ondas sonoras em meios sólidos podem ocorrer sob formas distintas das ondas sonoras em meios fluidos. De facto, as tensões de corte sofridas pelo meio sólido dão origem a uma série de tipo de ondas para além das ondas longitudinais mencionadas anteriormente para os meios fluidos, como por exemplo as ondas transversais ou de corte e as ondas de flexão.

Em acústica de edifícios, no processo de transmissão sonora, as ondas mais influentes são as ondas de flexão.

Os pontos seguintes apresentam as características base das ondas longitudinais, das ondas transversais ou de corte e das ondas de flexão.

2.9.1. Ondas longitudinais

As ondas longitudinais em meios sólidos ocorrem apenas em situações em que a dimensão da estrutura sólida é muito superior ao comprimento da onda longitudinal.

Considerando as dimensões dos elementos sólidos constituintes de um edifício (paredes, lajes, etc) e a gama de frequências relevantes (100 Hz – 3150 Hz) correspondentes a comprimentos de onda entre os 0,1 m a 3,4 m, verifica-se que este tipo de ondas não é muito relevante em acústica de edifícios.

A Figura 2.5 apresenta uma representação esquemática destas ondas.

^{ix} Pode ser consultada a [ref. 6] para obtenção de mais informação acerca deste assunto.

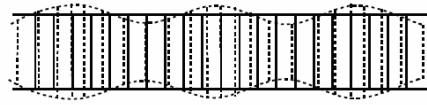


Figura 2.5 Ondas longitudinais - representação esquemática.

As linhas sólidas representam elementos da estrutura em repouso enquanto que as linhas a tracejado representam as deformações destes elementos na direcção de propagação da onda.

2.9.2. Ondas transversais ou de corte

À semelhança das ondas longitudinais, as ondas transversais em meios sólidos ocorrem apenas em situações em que a dimensão da estrutura sólida é muito superior ao comprimento da onda transversal, pelo que em acústica de edifícios este tipo de ondas não é muito relevante.

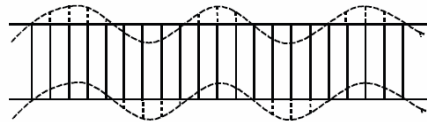


Figura 2.6 Ondas transversais - representação esquemática.

As linhas sólidas representam elementos da estrutura em repouso enquanto que as linhas a tracejado representam as deformações destes elementos na direcção de propagação da onda.

2.9.3. Ondas de flexão

As ondas de flexão são susceptíveis de serem geradas em elementos sólidos com uma ou duas dimensões pequenas quando comparadas com o comprimento de onda em jogo. Este facto faz com as ondas de flexão tenham um papel determinante na maioria dos elementos construtivos presentes nos edifícios, assumindo um papel central em acústica de edifícios.

Nas ondas de flexão em meios sólidos a velocidade das partículas é normal à direcção de propagação da onda, o que significa que é normal à superfície das paredes e ou lajes como pode ser visto na Figura 2.7.

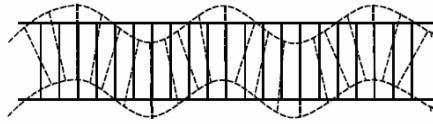


Figura 2.7 Ondas de flexão - representação esquemática.

O facto da velocidade das partículas ser normal à direcção de propagação da onda faz com que haja um acoplamento eficaz entre o meio sólido e o meio circundante (ar), levando a que as paredes e ou laje possam tornar-se fontes sonoras eficientes.

Considerando o caso de uma placa simples em vibração livre, a velocidade da partícula normal à superfície da placa pode ser escrita como:

$$B \frac{\partial^4 v_y}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 v_y}{\partial t^2} = 0 \quad \text{Equação 51}$$

onde:

B É a rigidez à flexão da placa

m É a massa superficial da placa (kg/m²)

Considerando uma solução do tipo:

$$v_y = v_y \cdot e^{j(\omega t - k_B x)} \quad \text{Equação 52}$$

e substituindo-a na Equação 51 obtemos a seguinte expressão para o número de onda:

$$k_B = \frac{\omega}{c_B} = \sqrt{\omega} \times \sqrt[4]{\frac{m}{B}} \quad (\text{m}^{-1}) \quad \text{Equação 53}$$

A velocidade de fase, C_B , é então dada por:

$$c_B = \sqrt{\omega} \times \sqrt[4]{\frac{B}{m}} \quad (\text{m/s}) \quad \text{Equação 54}$$

Considerando uma placa homogénea de espessura h , pode-se reescrever a Equação 54 como:

$$c_B \approx \sqrt{1,8 \cdot c_L \cdot h \cdot f} \quad (\text{m/s}) \text{ Equação 55}$$

onde:

f É a frequência (Hz)

c_L É a velocidade de propagação das ondas longitudinais (m/s) e pode ser calculada a partir de:

$$c_L = \sqrt{\frac{E_1}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (\text{m/s}) \text{ Equação 56}$$

onde:

E_1 É o módulo de elasticidade do material (N/m²)

ν É o coeficiente de Poisson

ρ É densidade do elemento (kg/m³)

Analisando a Equação 55 verifica-se que a velocidade de fase depende da frequência. Tem-se assim que um sinal sonoro de banda larga ao propagar-se num meio sólido sofrerá uma alteração no seu espectro.

2.10. FONTES SONORAS ^x

Como referido anteriormente, no processo de transmissão sonora entre compartimentos, os sinais sonoros são gerados essencialmente por sistemas vibratórios que introduzem alterações no meio onde ocorre a propagação (transformação da energia mecânica do sistema vibratório em energia acústica).

No processo de transmissão sonora entre compartimento, os processos de geração de ruído mais comuns são os resultantes da vibração dos elementos de construção como paredes, pavimentos ou tectos.

^x Pode ser consultada a [ref. 6] para obtenção de mais informação acerca deste assunto.

Estes elementos podem ser colocados a vibrar devido essencialmente a: i) pressão sonora (ruído aéreo) ou ii) impacto (ruído de percussão).

Ao estarem em contacto com o meio circundante, os elementos construtivos acabam por transferir o seu movimento vibratório ao ar, dando origem à transmissão sonora de um compartimento para outro.

No processo de transmissão sonora entre compartimentos é então essencial entender os mecanismos que levam à geração de ruído emitido pelos elementos construtivos dos edifícios (paredes, pavimentos, tectos).

Para tal é utilizada uma fonte sonora idealizada, do tipo monopólo, de modo a ilustrar propriedades base das fontes sonoras em geral.

2.10.1. Exemplo do monopólo

O monopolo pode ser visto como a fonte sonora idealizada mais simples.

Considere-se uma esfera pulsante, com raio a , cujo volume varia harmonicamente à frequência angular ω . A velocidade do contorno da esfera pode então ser descrita por:

$$u = \hat{u} \cdot e^{j\omega t} \quad \text{Equação 57}$$

A Figura 2.8 apresenta uma ilustração de uma fonte do tipo monopólo.

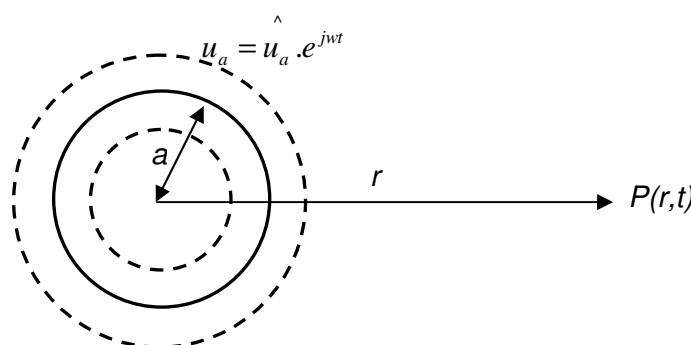


Figura 2.8 Ilustração de uma fonte do tipo monopólo.

Do processo de vibração da esfera é gerada uma onda sonora que, devido à simetria da esfera, apresenta igual amplitude em todas as direcções.

Como visto no ponto 2.6, fora da esfera a pressão sonora tem de ser solução da equação de onda, sendo do mesmo tipo da Equação 19:

$$P(r,t) = \frac{\hat{P}}{r} e^{i(\omega t - kr)} \quad \text{Equação 58}$$

\hat{P} pode ser determinado a partir de:

1. Equação da conservação do momento, Equação 11:

$$\nabla P = -\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t}$$

$$\frac{\partial P(r,t)}{\partial r} = -i \cdot \rho_0 \cdot \omega \cdot v(r,t) \Leftrightarrow \frac{\partial P(r,t)}{\partial r} = -i \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot k \cdot v(r,t)$$

2. Tendo em conta que a velocidade da partícula de ar ($v(r,t)$) quando $r = a$ tem de ser igual à velocidade do contorno da esfera (u_a):

Tem-se então:

$$\Leftrightarrow \frac{\partial P(r,t)}{\partial r} = -i \cdot \rho_0 \cdot c_0 \cdot k \cdot v(r,t) \quad \text{Equação 59}$$

Considerando $r = a$ pode-se escrever:

$$\hat{P}(a,t) = \rho_0 \hat{c}_0 u_a \frac{ika^2(1+ika)}{(1+ika)(1-ika)a} e^{i\omega t} \Leftrightarrow \hat{P}(a,t) = \rho_0 \hat{c}_0 u_a \frac{(ika + k^2 a^2)a}{(1+ika)(1-ika)a} e^{i\omega t} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \hat{P}(a,t) = \rho_0 \hat{c}_0 u_a \left(\frac{k^2 a^2}{1+k^2 a^2} + i \frac{ka}{1+k^2 a^2} \right) e^{i\omega t} \quad \text{Equação 60}$$

Verifica-se assim que a amplitude da pressão sonora é função de: i) um termo que se encontra em fase com a velocidade do contorno da esfera e ii) um termo que se encontra desfasado 90° em relação à velocidade do contorno da esfera.

O segundo termo, que se encontra desfasado 90° relativamente à velocidade, será dominante para os casos em que $Ka \ll 1$, ou seja para comprimentos de onda maiores do que a dimensão da esfera ($\lambda > a$).

Para valores de $Ka > 1$, o segundo termo tende para zero, passando o primeiro termo a dominar.

O primeiro termo multiplicado pela velocidade do contorno da esfera dará assim a intensidade activa associada à fonte, já o segundo membro quando multiplicado pela mesma velocidade dará a intensidade reactiva.

A potência sonora real radiada pela fonte será então dada por:

$$W = \rho_0 c_0 u_{rms,a}^2 \frac{k^2 a^2}{1 + k^2 a^2} S \text{ (W) Equação 61}$$

Com S igual à área da esfera ($4\pi a^2$).

O factor $\frac{k^2 a^2}{1 + k^2 a^2}$ representa o factor de radiação do monopólo.

O factor de radiação assume uma grande importância em acústica de edifícios, o ponto seguinte apresenta a sua definição.

É possível verificar que a eficiência de radiação do monopólo baixa nas baixas frequências.

2.11. RADIAÇÃO SONORA A PARTIR DE ELEMENTOS DE CONSTRUÇÃO ^{xi}

2.11.1. Factor de radiação sonora

Uma das características que influencia o isolamento sonoro conferido por um elemento ou construção, é a eficiência com que este se comporta como um radiador sonoro.

A caracterização da eficiência de radiação pode ser efectuada a partir do factor de radiação sonora, σ , que é definido por:

$$\sigma = \frac{W_{rad}}{\rho_0 c S u_{rms}^2} \text{ Equação 62}$$

onde:

W_{rad} É a potência sonora radiada pelo elemento em vibração.

u_{rms}^2 É a amplitude de velocidade média efectiva na superfície do elemento.

^{xi} Pode ser consultada a [ref. 6] para obtenção de mais informação acerca deste assunto.

O denominador da Equação 62 corresponde à potência radiada por uma área parcial S de uma superfície plana, com todas as partes da superfície a vibrar em fase com uma velocidade média igual a u_{rms}^2 .

A determinação do factor de radiação é normalmente efectuada a partir de medições. A previsão do factor de radiação não é simples, existindo no entanto algumas expressões analíticas para elementos com superfície plana que são utilizadas na ISO 12354-1 [ref. 7] (ver ponto 5.1).

3. ACÚSTICA DE ESPAÇOS FECHADOS

3.1. CAMPOS SONOROS

A descrição do campo sonoro no interior de um espaço fechado (sala) com fronteiras^{xii} de geometria e constituição arbitrárias não é uma tarefa simples, devido fundamentalmente à dificuldade em:

1. Definir com rigor a geometria das fronteiras;
2. Traduzir quantitativamente os processos de dissipação de energia sonora no ar e na envolvente;
3. Estimar as alterações das características direccionais das fontes sonoras quando emitem em espaços fechados.

Existem essencialmente duas formas de efectuar tal descrição: i) através da resolução da equação de onda, adoptando condições fronteira apropriadas. Neste caso a descrição é efectuada em termos da distribuição espectral da pressão sonora dos modos naturais de ondulação excitados pela fonte sonora (métodos determinísticos) e ii) através de métodos estatísticos em que a descrição é efectuada em termos da média espacial do valor eficaz da pressão sonora no interior do recinto.

O interesse da descrição ondulatória (métodos determinísticos) é o de permitir determinar a resposta da sala a frequências discretas, possibilitando desta forma a localização dos pontos de máxima e de mínima resposta (ventres e nodos). Com esta informação, é possível decidir acerca das propriedades físicas da sala, como por exemplo as suas dimensões, de modo a adequar a resposta da sala a determinada perturbação exterior aplicada (p. ex. fonte sonora). No entanto, nas altas frequências, com comprimentos de onda pequenos, para determinar a resposta da sala com precisão, é necessário adequar o tamanho dos elementos da sala aproximando-os do tamanho dos comprimentos de onda em análise. Isto faz com que seja necessário um refinamento do modelo da sala cada vez maior, levando a um aumento elevado dos elementos constituintes do sistema (sala) e,

^{xii} O termo fronteira refere-se aos elementos construtivos que confinam o espaço fechado (tecto, pavimento e paredes).

portanto, a um aumento das bases de dados e dos correspondentes tempos de computação. Para além disso, nas altas frequências, os modos naturais^{xiii} de vibração do ar no interior da sala aproximam-se muito uns dos outros (elevada densidade modal), o que faz com que os modelos determinísticos deixem de conseguir determinar com rigor a resposta da sala, pois bastam pequenas variações entre o modelo e a realidade para que o modo determinante na resposta da sala mude.

Ao contrário dos métodos determinísticos, a descrição estatística conduz ao estabelecimento de expressões simples, de larga aplicação no estudo de problemas de acústica de espaços fechados. Os métodos estatísticos são aplicados para estimar médias espaciais. Deixam de dar resposta a frequências discretas, passando, no caso da acústica, a dar respostas em bandas de frequência (normalmente bandas de oitava ou de um terço de oitava). Estes métodos assumem a presença de campos difusos, ou seja, a presença de uma elevada densidade modal. Aplicam-se assim nas altas frequências, quando o número de modos em cada banda de frequência de interesse é elevado, fazendo com que a resposta a cada banda de frequência tenha o contributo de vários modos. Estas características fazem com que haja uma menor variação espacial na resposta.

A presença de uma elevada densidade modal ocorre quando a distância entre as frequências naturais^{xiv} do sistema (sala) se torna inferior à largura de banda das ressonâncias.

xiii Denominam-se modos normais de vibração do ar no interior de uma sala, aos estados de vibração em regime livre (inexistência de fontes sonoras) que possam ser excitados por uma perturbação local das condições de repouso. Estes modos são determinados unicamente pelas propriedades elásticas do ar, forma e dimensões do espaço e dissipação da energia sonora no ar e no contorno. A cada modo normal de vibração corresponde uma única frequência denominada frequência natural.

xiv As frequências naturais de um sistema correspondem às frequência a que o sistema naturalmente vibra quando sujeito a uma perturbação inicial (afastado da sua posição de equilíbrio) e libertado (regime livre). Dependendo da perturbação inicial, o sistema pode ficar a vibrar em qualquer dos seus modos de vibração, ou seja, o sistema possui tantas frequências naturais quantos modos de vibração.

A frequência de *Schroeder* permite estimar a frequência a partir da qual se pode considerar em presença de uma elevada densidade modal e, portanto, utilizar métodos estatísticos:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \text{ (Hz) Equação 63}$$

onde:

f_s É a frequência de *Schroeder* (Hz)

V É o volume do espaço fechado (m^3)

T É o tempo de reverberação do espaço fechado (s) (ver ponto 3.3)

No presente trabalho, devido à gama de frequências em jogo (100 Hz – 3150 Hz), as análises efectuadas e mostradas nos pontos seguintes têm por base métodos estatísticos, em particular o modelo do campo difuso descrito no ponto 3.2.

3.2. MODELO DO CAMPO DIFUSO

Num campo difuso ideal a densidade de energia é igual em todo o espaço, não havendo uma direcção de propagação sonora privilegiada tornando aleatório o ângulo de incidência nas fronteiras do espaço fechado.

O número de modos em cada banda de frequência de interesse começa a ser elevado passando a ser possível expressar as variáveis apresentadas anteriormente (pressão sonora, potência sonora, etc) por meios estatísticos.

A partir do balanço de energia sonora num espaço fechado onde uma fonte sonora está a radiar uma determinada potência sonora W (ver Figura 3.1^{xv}), surge um estado estacionário quando, por segundo, a energia gerada pela fonte sonora iguala a energia “consumida” por todos os materiais absorventes sonoros existentes no compartimento, ou seja a energia sonora no interior do espaço fechado mantém-se constante. Demonstra-se [ref. 6] que este estado estacionário é dado por:

$$W = \frac{P_{RMS}^2}{4\rho c} A \Leftrightarrow W = I \times A \text{ (W) Equação 64}$$

^{xv} Figura retirada de [ref. 6].

onde:

W É a potência sonora da fonte (W).

A É a área de absorção sonora equivalente do compartimento ($A = \sum S_j \alpha_j$) (m^2).

S_j Área das superfícies do compartimento (m^2)

α_j Coeficiente de absorção sonora das superfícies.

I É a intensidade sonora (W/m^2).

P_{RMS} É a pressão sonora eficaz no interior do compartimento (N/m^2).

ρ É a densidade do ar (meio de propagação sonora) ($1,2 \text{ kg/m}^3$).

c É a velocidade do som no ar ($c = 340 \text{ m/s}$).

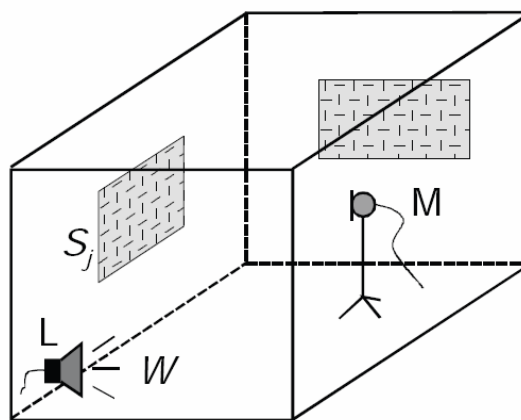


Figura 3.1 Fonte sonora a radiar uma potência sonora W dentro de um espaço fechado.

3.3. TEMPOS DE REVERBERAÇÃO

Quando a fonte sonora ilustrada na Figura 3.1 é desligada, a densidade de energia sonora dentro do espaço fechado diminui.

O tempo de reverberação de um espaço fechado é definido como sendo igual ao intervalo de tempo necessário para que a densidade de energia diminua de um factor de 10^{-6} ou seja que o nível de pressão sonora dentro do espaço fechado diminua 60 dB.

Considerando a presença de um campo sonoro difuso no espaço fechado, é válida a expressão de *Sabine* para o Tempo de Reverberação:

$$T = \frac{0,16V}{A} \Leftrightarrow A = \frac{0,16V}{T} \text{ (m}^2\text{)} \text{ Equação 65}$$

onde:

- T É o tempo de reverberação no espaço fechado (s)
V É o volume do compartimento receptor (m^3)
A É a área de absorção sonora equivalente do espaço fechado (m^2)

3.4. ISOLAMENTO SONORO A SONS DE CONDUÇÃO AÉREA

Outro parâmetro que em acústica de espaços fechados importa analisar é o isolamento sonoro conferido pelas fronteiras dos espaços (lajes, paredes, etc).

O presente trabalho foca precisamente o tema do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos. Os pontos seguintes analisam com detalhe todos os aspetos associados ao isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos, nomeadamente: i) parâmetros utilizados na avaliação do isolamento sonoro entre compartimentos (pontos 3.4.1 a 3.4.7); ii) modelos de cálculo normalizados utilizados em Portugal para determinar o índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea (ponto 4) e iii) obtenção dos dados de entrada dos modelos de cálculo (ponto 5).

3.4.1. Parâmetros legais

Como referido anteriormente, o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), Decreto-lei 96/2008 de 9 de Junho, estabelece um conjunto de critérios aplicáveis ao isolamento sonoro, ao tempo de reverberação e ao ruído emitido por equipamentos colectivos no interior dos edifícios com vista a melhorar as condições de qualidade acústica do edificado.

Relativamente ao isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos, para efeitos de estabelecimento de condições suficientes de controlo de transmissão sonora entre diferentes compartimentos, o RRAE apoia-se no seguinte parâmetro caracterizador (índice):

$D_{nT,w}$ Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado (dB).

O parâmetro $D_{nT,w}$ caracteriza sob a forma de índice (valor único), a perda de energia sonora, no domínio da frequência, D_{nT} , conforme descrito pela expressão:

$$D_{nT} = D + 10 \lg \left(\frac{T}{T_0} \right) \text{ (dB) Equação 66}$$

com:

$$D = L_1 - L_2 \text{ (dB) Equação 67}$$

onde:

- D_{nT} É o isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado (dB);
- D É o isolamento sonoro a sons de condução aérea bruto: Diferença, em decibéis, entre os níveis médios da pressão sonora estabelecidos em dois compartimentos, por uma ou mais fontes sonoras, situadas dentro de um deles:
- L_1 É o nível médio de pressão sonora medida no compartimento emissor (dB);
- L_2 É o nível médio de pressão sonora medida no compartimento receptor (dB);
- T É o tempo de reverberação do compartimento receptor (s).
- T_0 É o tempo de reverberação de referência, em segundos (para compartimentos habitacionais ou com dimensões comparáveis, $T_0 = 0,5$ s).

De acordo com o RRAE a verificação da conformidade das disposições presentes no regulamento, deve ser efectuada com base em ensaios acústicos, realizados de acordo com a normalização aplicável.

Em Portugal as medições do isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado, D_{nT} , deverão ser realizadas de acordo com a ISO 140 parte 4 [ref. 8]. Já a perda de energia sonora no domínio da frequência, D_{nT} , deverá ser traduzida por um valor único (índice), $D_{nT,w}$, por aplicação da norma ISO 717-1 [ref. 9]. Os resultados obtidos podem então ser comparados com os limites impostos no RRAE de modo a avaliar o cumprimento dos requisitos legais aplicáveis.

3.4.2. Coefficiente de transmissão sonora

O isolamento sonoro induzido por determinado elemento divisório pressupõe a ocorrência de um processo de transmissão sonora de um local emissor para um local receptor.

No caso do isolamento sonoro a sons de condução aérea, o processo de transmissão sonora, como o próprio nome indica, ocorre por acção de sons aéreos, ou seja sons que se

propagam pelo ar como seja o caso dos sons emitidos por fontes aéreas (televisão, rádio, fala, etc) e que podem ser transmitidos através dos elementos de construção (paredes, tecto, pavimento, janelas, etc.).

O coeficiente de transmissão sonora de um elemento construtivo de separação entre dois compartimentos é dado por:

$$\tau' = \frac{W_2}{W_1} \text{ Equação 68}$$

onde:

W_1 É a potência sonora que incide no elemento de separação entre o compartimento emissor e o compartimento receptor.

W_2 É a potência sonora total transmitida ao compartimento receptor.

3.4.3. Índice de redução sonora

O índice de redução sonora, R , é definido por:

$$R = -10 \lg \tau' \Leftrightarrow R = -10 \lg \left(\frac{W_2}{W_1} \right) \text{ (dB) Equação 69}$$

Este índice consiste numa medida do desempenho do isolamento sonoro a sons de condução aérea conferido por determinado elemento de separação quando aplicado em condições de laboratório, ou seja, em condições onde o elemento se encontra isolado em todo o seu perímetro de contacto.

Em laboratório, devido às condições controladas de instalação do elemento de separação, pode considerar-se que toda a potência sonora transmitida ao compartimento receptor ocorre apenas por via directa, ou seja através do elemento de separação (ver Figura 3.2).

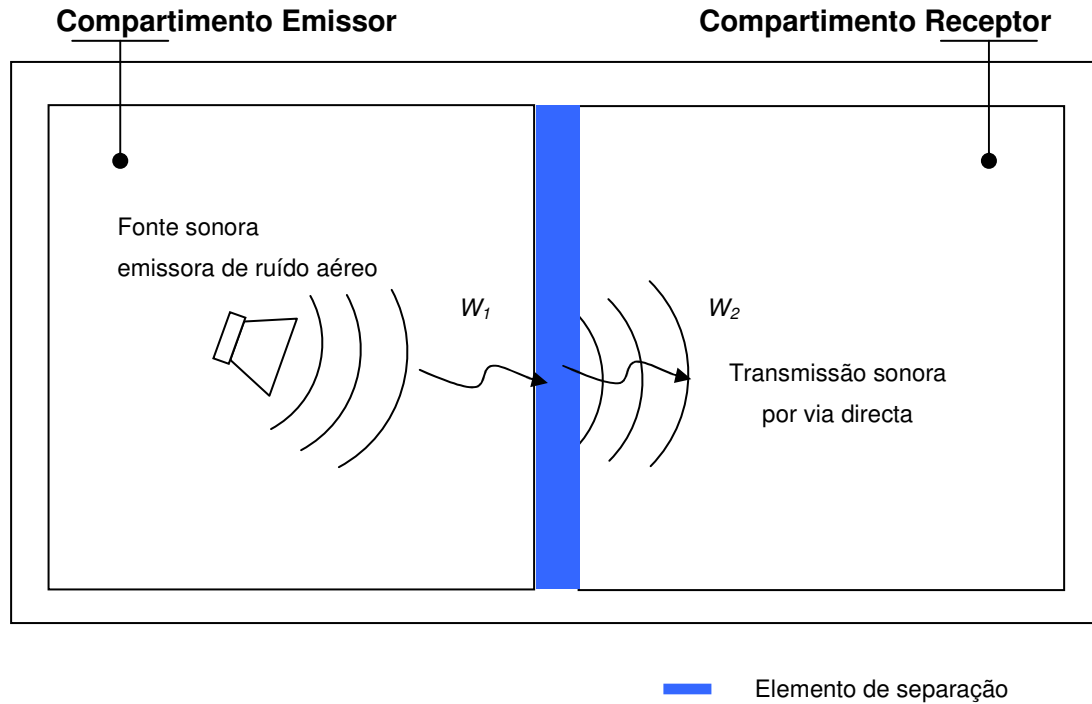


Figura 3.2 Corte exemplificativo de um edifício – Transmissão sonora por via directa através do elemento de separação entre o compartimento emissor e o compartimento receptor.

Assumindo que, tanto no compartimento emissor, como no compartimento receptor, o campo sonoro é difuso (ver pontos 3.1 e 3.2), W_1 e W_2 podem ser calculadas com base na teoria do campo difuso, a partir do balanço da potência sonora nos compartimentos (ver ponto 3.2).

Tem-se então:

$$W_1 = I \times S_s = \frac{P_1^2}{4\rho c} S_s \quad (\text{W}) \quad ; \quad W_2 = \frac{P_2^2}{4\rho c} A \quad (\text{W})$$

$$\tau = \frac{W_2}{W_1} \Leftrightarrow \tau' = \frac{\frac{P_2^2}{4\rho c} A}{\frac{P_1^2}{4\rho c} S_s} \Leftrightarrow \tau = \frac{P_2^2}{P_1^2} \cdot \frac{A}{S_s} \quad (\text{W}) \quad \text{Equação 70}$$

R pode ser então definido como:

$$R = -10 \lg \tau' \Leftrightarrow R = -10 \lg \left(\frac{P_2^2}{P_1^2} \cdot \frac{A}{S_s} \right) \quad (\text{dB}) \quad \text{Equação 71}$$

Tendo em conta que o nível de pressão sonora é dado por (ver ponto 2.5):

$$L = 10 \lg \left(\frac{P}{P_0} \right)^2 \quad (\text{dB}) \quad \text{Equação 72}$$

Ficamos com:

$$R = -10 \lg \left(\frac{P_2^2}{P_1^2} \cdot \frac{P_0^2}{P_0^2} \cdot \frac{A}{S_s} \right) \Leftrightarrow R = -10 \lg \left(\frac{P_2^2}{P_0^2} \right) + 10 \lg \left(\frac{P_1^2}{P_0^2} \right) + 10 \lg \left(\frac{S_s}{A} \right) \quad (\text{dB}) \quad \text{Equação 73}$$

Podemos então escrever R como:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \left(\frac{S_s}{A} \right) \quad (\text{dB}) \quad \text{Equação 74}$$

onde:

- L_1 É o nível médio de pressão sonora medida no compartimento emissor (dB);
- L_2 É o nível médio de pressão sonora medida no compartimento receptor (dB);
- S_s É a área do elemento de separação (m²);
- A É a área de absorção sonora equivalente do compartimento receptor (m²).

Como referido em 2.9.3 a velocidade de fase é função da frequência assim, naturalmente, um elemento de construção homogéneo proporciona uma redução sonora em função também da frequência. Essa variação segue um andamento que se apresenta na Figura 3.3.

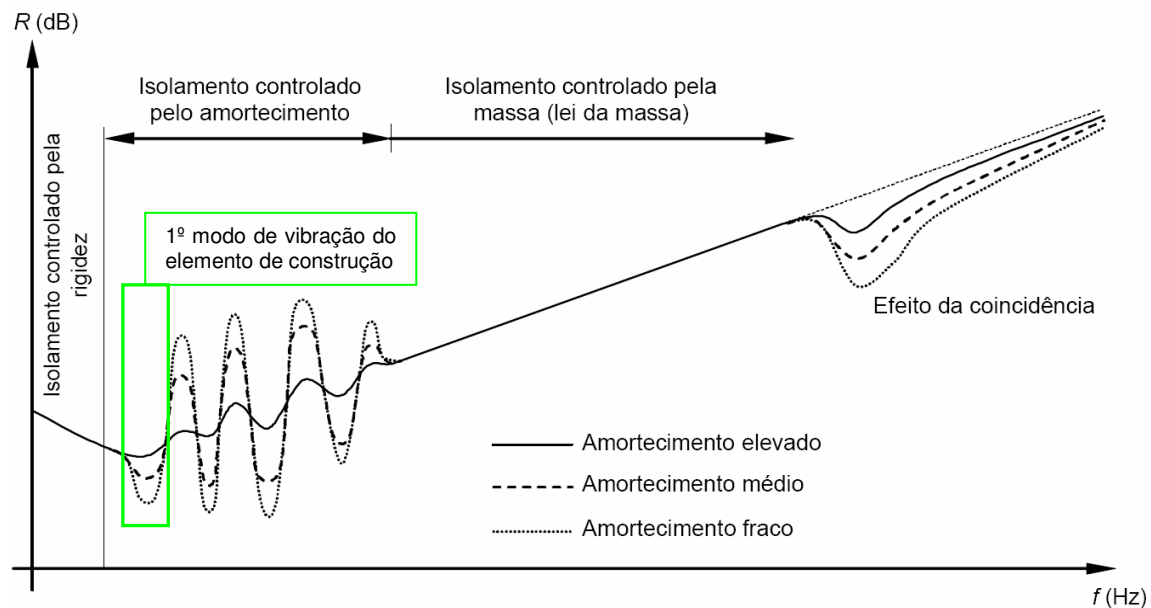
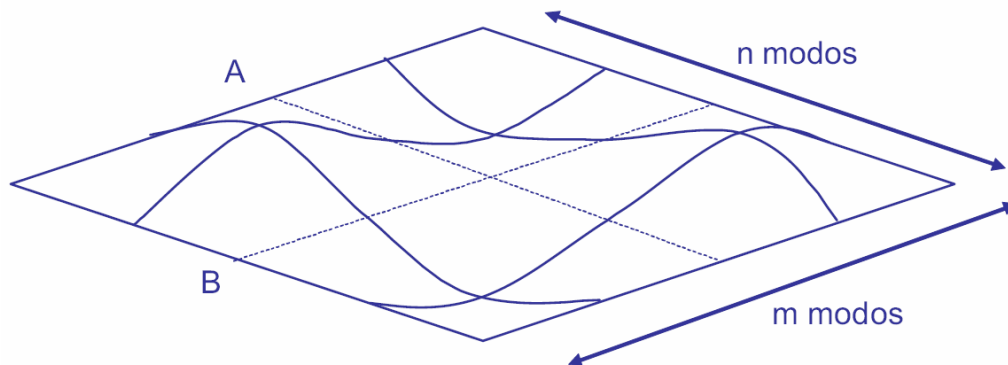


Figura 3.3 Curva da redução sonora – elemento de construção homogêneo.

Observa-se uma zona inicial controlada pela rigidez do elemento, situada em frequências abaixo dos modos de vibração estrutural do elemento. Nesta zona, o elemento vibra como um todo, apresentando o comportamento típico de um sistema massa-mola, sendo a redução sonora proporcional à sua rigidez equivalente. A redução sonora decai cerca de 6 dB por oitava, até que seja atingida a frequência correspondente ao 1º modo de vibração do elemento.

Na zona seguinte (isolamento controlado pelo amortecimento), surgem os modos de vibração estrutural do elemento (ressonâncias do material), nas quais a redução sonora proporcionada sofre variações tão elevadas quanto mais fraco for o amortecimento do material.

As frequências de ocorrência dos modos de vibração estrutural para uma placa simples de formato rectangular são dadas por:



$$f_{m,n} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E.I}{m'(1-\nu^2)}} \cdot \left(\left(\frac{m}{A} \right)^2 + \left(\frac{n}{B} \right)^2 \right) \text{ (Hz) Equação 75}$$

onde:

A, B São as dimensões dos lados da placa (m)

m, n É a ordem do modo de vibração

m' É a massa superficial do elemento (kg/m^2)

E É o módulo de elasticidade do material (módulo de Young) (N/m^2)

I É o momento de inércia em placas (m^4/m)

ν É o coeficiente de Poisson do material

Com o aumento da frequência as frequências dos diferentes modos de vibração aproximam-se, passando a redução sonora do elemento a ser determinada essencialmente pela sua massa, entrando-se na zona de validação da Lei da Massa^{xvi}. A Lei da Massa é dada por:

$$R = 10 \lg \left(\frac{\pi f m'}{\rho_0 c_0} \right)^2 \text{ (dB) Equação 76}$$

Finalmente há a acrescentar o fenómeno que ocorre em torno da denominada frequência de coincidência. Esta frequência é aquela em que se verifica que a velocidade de propagação das ondas sonoras no ar é equivalente à velocidade de propagação das ondas de flexão da parede. Neste caso, sucede um fenómeno de coerência de radiação para o compartimento receptor (resultando da vibração forçada induzida no elemento pelo campo sonoro incidente

^{xvi} ^{xvi} Pode ser consultada a referência [ref. 10] para obtenção da dedução da Lei da Massa.

e da radiação das ondas de flexão do painel) que resulta numa diminuição da redução sonora face ao esperado pela aplicação da Lei da Massa.

Este fenómeno é ilustrado na Figura 3.4 e a sua influência na redução sonora encontra-se assinalado na Figura 3.3.

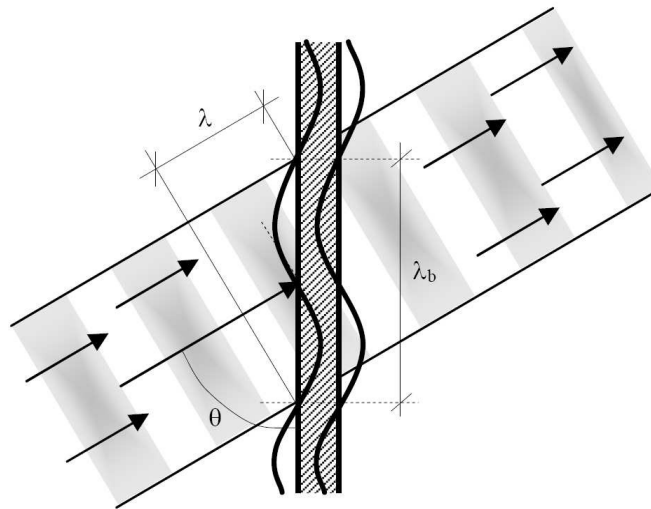


Figura 3.4 Ilustração do fenómeno que ocorre na frequência de coincidência

Considerando a Equação 55 e igualando a velocidade de fase, C_B , à velocidade de propagação do som no ar, C_o , é possível obter-se a frequência crítica para placas homogéneas:

$$f_c \approx \frac{c_B^2}{1,8 \cdot c_L \cdot h} \text{ (Hz) Equação 77}$$

3.4.4. Índice de redução sonora aparente

Contrariamente à situação de laboratório (situação controlada), em que só existe um caminho de transmissão sonora (transmissão por via directa), em obra encontram-se vários caminhos de transmissão sonora.

De facto, as ondas sonoras geradas no compartimento emissor ao incidirem nos elementos construtivos do compartimento (elemento de separação, paredes, tecto e pavimento) provocam nesses elementos forças normais de amplitude variável. Como resposta todos os elementos construtivos do compartimento emissor adquirem movimentos vibratórios, sendo

que, parte dessa energia é então transmitida aos elementos construtivos do compartimento receptor e então radiada como som.

Assim, passa a ser possível distinguir dois tipos de transmissão sonora: i) transmissão directa, como já referido no ponto anterior consiste na transmissão sonora que ocorre através do elemento de separação e ii) transmissão marginal, constituída pela transmissão sonora que ocorre através dos elementos marginais ao elemento de separação.

Estes dois tipos de transmissão sonora, directa e marginal, ocorrem por meio da estrutura, ou seja, através dos elementos construtivos. É ainda de referir que, no caso de existirem aberturas nos elementos de construção (frinchas, condutas, janelas, portas abertas, etc), pode ainda ocorrer transmissão sonora por via aérea.

Os diferentes tipos de transmissão sonora, quer por via estrutural (directa e marginal) quer por via aérea (directa e indirecta), explica eventuais diferenças entre valores de isolamento sonoro de um mesmo elemento de separação, quando a sua determinação é feita em laboratório (onde é desprezável a transmissão marginal e onde não ocorre transmissão por via aérea) ou instalado em obra, onde, poderá ocorrer transmissão marginal significativa e mesmo transmissão por via aérea [ref. 11].

Assim, em obra, a potência sonora no compartimento receptor, W_2 (ver Equação 68), no caso de dois compartimentos adjacentes ou sobrepostos, será constituída pela potência sonora radiada pelo elemento de separação, pela potência sonora radiada pelos elementos adjacentes ao elemento de separação e pela eventual transmissão sonora por via aérea (directa e/ou indirecta).

À semelhança de R , R' é dado por:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \lg \left(\frac{S_s}{A} \right) \text{ (dB) Equação 78}$$

onde:

- L_1 É o nível médio de pressão sonora medida no compartimento emissor (dB);
- L_2 É o nível médio de pressão sonora medida no compartimento receptor (dB);
- S_s É a área do elemento de separação (m^2);

A É a área de absorção sonora equivalente do compartimento receptor (m^2).

3.4.5. Índice de isolamento sonoro sons de condução aérea

Como referido em 3.1., D_{nT} é definido como:

$$D_{nT} = D + 10 \lg \left(\frac{T}{T_0} \right) \text{ (dB) Equação 79}$$

com:

$$D = L_1 - L_2 \text{ (dB) Equação 80}$$

Ficando:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \lg \left(\frac{T}{T_0} \right) \text{ (dB) Equação 81}$$

onde:

D_{nT} É o isolamento sonoro a sons de condução aérea, padronizado (dB);

D É o isolamento sonoro a sons de condução aérea bruto: Diferença, em decibéis, entre os níveis médios da pressão sonora estabelecidos em dois compartimentos, por uma ou mais fontes sonoras, situadas dentro de um deles:

L_1 É o nível médio de pressão sonora medida no compartimento emissor (dB);

L_2 É o nível médio de pressão sonora medida no compartimento receptor (dB);

T É o tempo de reverberação do compartimento receptor (s).

T_0 É o tempo de reverberação de referência, em segundos (para compartimentos habitacionais ou com dimensões comparáveis, $T_0 = 0,5$ s).

3.4.6. Relação entre D_{nT} e R'

O índice D_{nT} pode ser relacionado com o índice de redução sonora aparente^{xvii} (R') através de:

^{xvii} D_{nT} é relacionado com R' e não com R , pois D_{nT} é um parâmetro caracterizador do desempenho do isolamento sonoro de elementos construtivos aplicados *in situ*.

$$\begin{cases} D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \lg \left(\frac{T}{T_0} \right) \\ R' = L_1 - L_2 + 10 \lg \left(\frac{S_s}{A} \right) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} - \\ L_1 - L_2 = R' + 10 \lg \left(\frac{A}{S_s} \right) \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow D_{nT} = R' + 10 \lg \left(\frac{A}{S_s} \right) + 10 \lg \left(\frac{T}{T_0} \right) \text{ (dB) Equação 82}$$

Tendo em conta que, como já assumido em 3.4.3, como campo sonoro em ambos os compartimentos é difuso é válida a expressão de Sabine para o Tempo de Reverberação:

$$T = \frac{0,16V}{A} \Leftrightarrow A = \frac{0,16V}{T} \text{ (m}^2\text{) Equação 83}$$

onde:

T É o tempo de reverberação no compartimento receptor (s)

V É o volume do compartimento receptor (m³)

A É a área de absorção sonora equivalente do compartimento receptor (m²)

Aplicando a Equação 83 na Equação 82 ficamos com:

$$D_{nT} = R' + 10 \lg \left(\frac{0,16V}{T \cdot S_s} \cdot \frac{T}{T_0} \right) \text{ (dB)}$$

Ou seja:

$$D_{nT} = R' + 10 \lg \left(\frac{0,32V}{S_s} \right) \text{ (dB) Equação 84}$$

Obtém-se assim o parâmetro D_{nT} em função do valor do índice de redução sonora aparente (R'), do valor da área do elemento de separação (S) e do volume do compartimento receptor (V).

A obtenção de S e de V é directa. Quanto a R' , pode ser determinado ou por medições *in situ* de acordo com a Equação 78 ou, quando em fase de projecto, a partir de modelos de cálculo normalizados. O ponto 4 apresenta os modelos de cálculo normalizados para determinação de R' .

3.4.7. Valor único do isolamento sonoro a sons de condução aérea

Como referido em 3.4.1, a perda de energia sonora no domínio da frequência, D_{nT} , deverá ser traduzida por um valor único, $D_{nT,w}$, de modo a poder ser avaliada a conformidade com as especificações legais constantes do RRAE.

O procedimento para substituir a descrição no domínio da frequência por um único valor é descrito na norma ISO 717-1 [ref. 9], e baseia-se na comparação da descrição do comportamento do sistema de isolamento no domínio da frequência, D_{nT} , com uma descrição convencional de referência cuja evolução no domínio da frequência é apresentada Tabela 3.1 e ilustrada na Figura 3.5.

Tabela 3.1 Curva de referência para sons aéreos - Descrição convencional de referência de isolamento sonoro a sons aéreos.

Bandas de frequências (Hz)	Valores de referência, dB	
	Bandas de terços de oitava	Bandas de oitava
100	33	
125	36	36
160	39	
200	42	
250	45	45
315	48	
400	51	
500	52	52
630	53	
800	54	
1000	55	55
1250	56	
1600	56	
2000	56	56
2500	56	
3150	56	

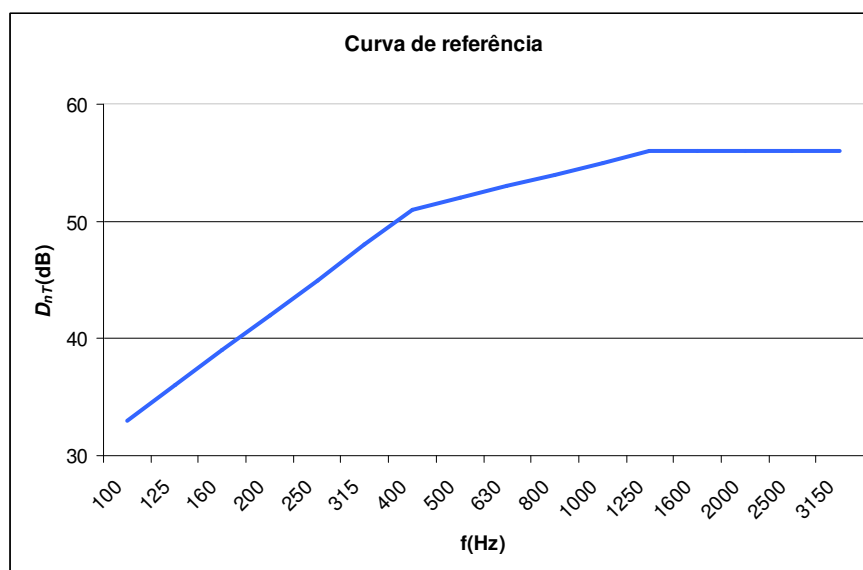


Figura 3.5 Curva de referência para sons aéreos - Descrição convencional de referência de isolamento sonoro a sons aéreos.

O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, $D_{nT,W}$, corresponde ao valor, arredondado para o número inteiro, da ordenada da descrição de referência de isolamento

sonoro a sons aéreos na banda de 500 Hz, quando se assume que o desvio desfavorável^{xviii} máximo entre a descrição do comportamento do sistema de isolamento no domínio da frequência (D_{nT}) e a curva de referência em causa, tem um valor igual ao dobro do número de bandas de frequências consideradas no processo de avaliação.

^{xviii} Desvio desfavorável é todo aquele em que o valor da função do isolamento sonoro é inferior ao valor correspondente da curva de referência.

4. MODELOS DE CÁLCULO DE R'

Os modelos normalizados que deverão ser utilizados em fase de projecto são os descritos na ISO 12354-1 [ref. 7].

Esta norma apresenta dois modelos para o cálculo das transmissões sonoras: modelo simplificado e modelo detalhado.

O modelo detalhado permite o cálculo de R' para as várias bandas de frequência. Já o modelo simplificado apenas permite o cálculo aproximado de R' aos 500Hz.

O ponto 4.1 apresenta os princípios gerais aos dois modelos.

Os pontos 4.2.1 e 4.2.2 apresentam, respectivamente, o modelo detalhado e o modelo simplificado.

4.1. PRINCÍPIOS GERAIS

Como referido em 3.4.4, em obra, a potência sonora no compartimento receptor, W_2 (ver Equação 68), é constituída pela potência sonora radiada pelo elemento de separação, pela potência sonora radiada pelos elementos adjacentes ao elemento de separação e pela eventual transmissão sonora por via aérea (directa e/ou indirecta).

Desta forma, os modelos de cálculo constantes da ISO 12354-1 [ref. 7] consideram a existência de vários caminhos de transmissão sonora.

A Figura 4.1 ilustra os vários caminhos de transmissão sonora por via estrutural para um dos elementos adjacentes ao elemento de separação e para o elemento de separação. No compartimento emissor os elementos i são designados por F para o elemento adjacentes e por D para o elemento de separação, no compartimento receptor os elementos j são designados por f para o elemento adjacente e por d para o elemento de separação.

A Figura 4.2 ilustra alguns dos caminhos de transmissão sonora por via aérea que podem ocorrer entre dois compartimentos adjacentes ou sobrepostos.

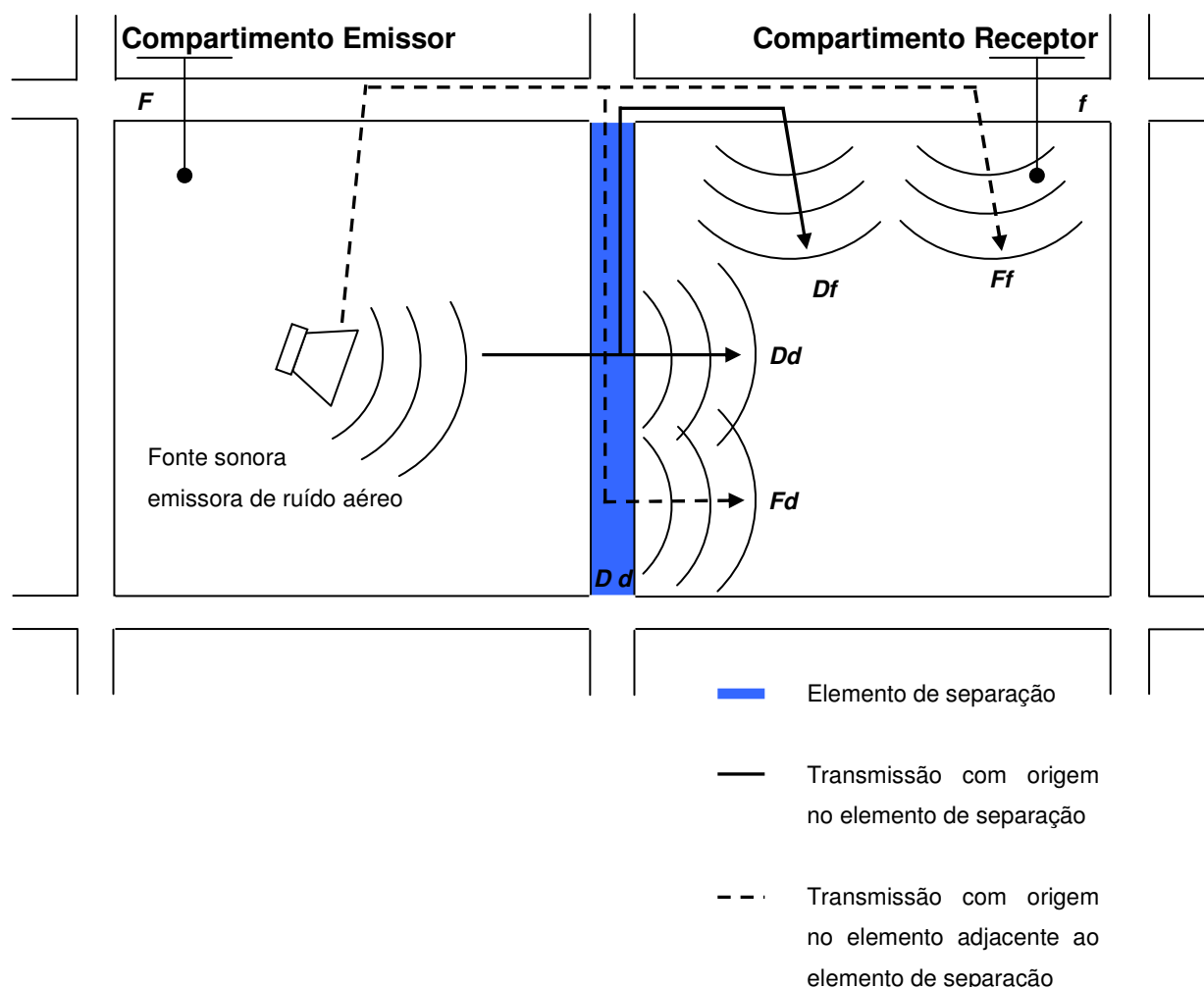


Figura 4.1 Corte exemplificativo de um edifício – Transmissão sonora por via estrutural: transmissão directa, através do elemento de separação, e transmissão marginal, através dos elementos adjacentes ao elemento de separação.

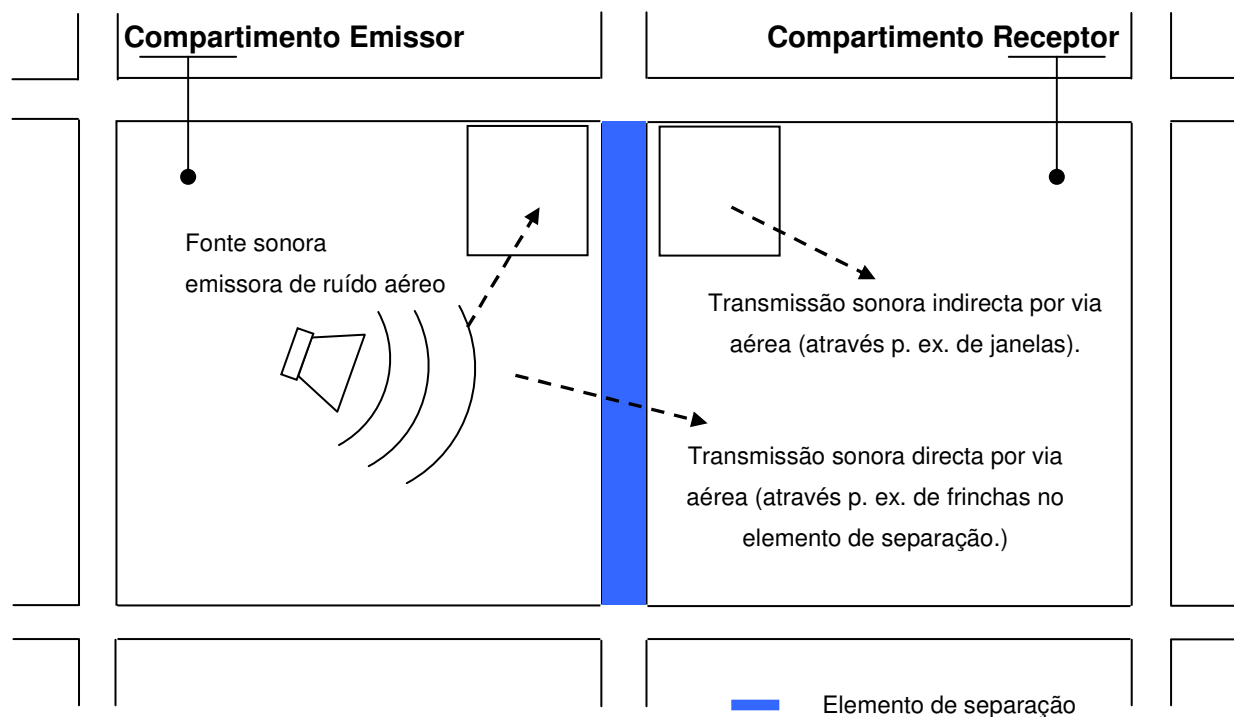


Figura 4.2 Corte exemplificativo de um edifício – Transmissão sonora por via aérea: transmissão directa, através do elemento de separação, e transmissão indirecta, através de aberturas nos elementos adjacentes ao elemento de separação.

Todo este processo de transmissão sonora tem associado uma determinada atenuação sonora característica do isolamento sonoro entre os dois compartimentos.

O isolamento sonoro entre os dois compartimentos será então função da composição do elemento de separação, da composição dos elementos adjacentes, do tipo de ligação entre os diferentes elementos e da existência ou não de aberturas nos elementos de construção.

Da observação da Figura 4.1 e da Figura 4.2 facilmente se conclui que o coeficiente de transmissão sonora total é dado por:

$$\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s \quad \text{Equação 85}$$

Onde:

τ' É o coeficiente de transmissão sonora total radiada no compartimento receptor ($\tau' = W_2/W_1$).

- τ_d É o coeficiente de transmissão sonora total radiada no compartimento receptor por via directa (inclui os caminhos Dd e Fd ilustrados na Figura 4.1.).
- τ_f É o coeficiente de transmissão sonora total radiada no compartimento receptor pelos elementos adjacentes (inclui os caminhos Ff e Df ilustrados na Figura 4.1.).
- τ_e É o coeficiente de transmissão sonora total radiada no compartimento receptor onde pode ocorrer transmissão sonora directa por via aérea (p. ex. aberturas ou sistemas de ventilação dispostos no elemento de separação).
- τ_s É o coeficiente de transmissão sonora total radiada no compartimento receptor onde pode ocorrer transmissão por sonora indirecta por via aérea (p. ex. propagação pelo exterior do edifício através das janelas dos respectivos compartimentos ou, no caso de verificação do isolamento entre espaços de um mesmo fogo a que possa ocorrer por corredores ou quaisquer outras zonas comuns).
- n É o número total de elementos adjacentes.
- m É o número de elementos com transmissão directa por via aérea.
- k É o número de sistemas com transmissão indirecta por via aérea.

É de notar que o presente trabalho apenas foca a transmissão sonora por via estrutural. De facto, por um lado ainda não existe um método normalizado que permita contabilizar a transmissão sonora por via aérea. Por outro, os métodos de ensaio normalizados utilizados na verificação de conformidade regulamentar exigem que, quando dos ensaios, todas as portas e janelas dos compartimentos estejam fechadas, ou seja, para a maior parte dos casos a transmissão sonora por via aérea é desprezável.

Apresenta-se de seguida os modelos de cálculo para a transmissão sonora por via estrutural constantes da ISO 12354-1 [ref. 7].

4.2. TRANSMISSÃO SONORA POR VIA ESTRUTURAL

Tendo por base a $\tau' = \tau_d + \sum_{f=1}^n \tau_f + \sum_{e=1}^m \tau_e + \sum_{s=1}^k \tau_s$ Equação 85 e pelo exposto em 4.1, podemos escrever:

$$\tau_d = \tau_{Dd} + \sum_{F=1}^n \tau_{Fd} \quad \text{Equação 86}$$

$$\tau_f = \tau_{Df} + \tau_{Ff} \quad \text{Equação 87}$$

em que,

$$\tau_{Dd} = 10^{-\frac{R_{Dd}}{10}} \quad \text{Equação 88}$$

$$\tau_{ij} = 10^{-\frac{R_{ij}}{10}} \quad \text{Equação 89}$$

sendo:

R_{Dd} É o índice de redução sonora para a transmissão directa

R_{ij} É o índice de redução sonora para as transmissões marginais

O índice de redução sonora para as transmissões que ocorrem por via estrutural é então dado por (ver Figura 4.1):

$$\begin{aligned} R' &= -10 \lg \left(\tau_{Dd} + \sum_{F=f=1}^n \tau_{Ff} + \sum_{f=1}^n \tau_{Df} + \sum_{F=1}^n \tau_{Fd} \right) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow R' &= -10 \lg \left(10^{-\frac{R_{Dd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\frac{R_{Ff}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{Df}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{Fd}}{10}} \right) \text{ (dB) Equação 90} \end{aligned}$$

R_{Dd} e R_{ij} correspondem aos índices de redução sonora determinados em laboratório ou por modelação. Como estamos a analisar a situação *in situ*, os valores de laboratório deverão, naturalmente, ser convertidos em valores de isolamento sonoro *in situ* (R_{situ}).

4.2.1. Modelo de cálculo detalhado

4.2.1.1. Índice de redução sonora para a transmissão directa

Pode-se definir o índice de redução sonora para a transmissão directa, R_{Dd} , como:

$$R_{Dd} = R_{s,situ} \text{ (dB) Equação 91}$$

onde:

$R_{s,situ}$ É o índice de redução sonora *in situ* para o elemento de separação.

4.2.1.2. Índice de redução sonora para as transmissões marginais

Pode-se definir o índice de redução sonora para as transmissões marginais, R_{ij} , que contém o elemento i de área S_i no compartimento emissor e o correspondente elemento j de área S_j no compartimento receptor, como:

$$R_{ij} = 10 \lg \left(\frac{1}{\tau_{ij}} \right) = 10 \lg \left(\frac{W_S}{W_{ij}} \right) = 10 \lg \left(\frac{I_i \cdot S_S}{I_j \cdot S_j} \right) \text{ (dB) Equação 92}$$

onde:

W_S É a potência sonora incidente no elemento de separação.

W_{ij} É a potência sonora radiada através do elemento j para o compartimento receptor devido à transmissão de vibração do elemento i do compartimento emissor.

I_i É a intensidade sonora incidente nos elementos do compartimento emissor (assume-se que é igual em todas as superfícies do compartimento emissor).

I_j É a intensidade sonora radiada pelo elemento j do compartimento receptor.

S_S É a área do elemento de separação^{xix}.

S_j É a área do elemento j no compartimento receptor.

Considerando a aproximação já considerada anteriormente de que, tanto no compartimento emissor, como no compartimento receptor, o campo sonoro é difuso (ver ponto 3.4.3), W_S e W_{ij} podem ser calculadas a partir de:

$$W_S = \frac{P_{rms,S}^2}{4\rho_0 c} S_S \text{ (W) Equação 93}$$

$$W_{ij} = \frac{P_{rms,R,ij}^2}{4\rho_0 c} A_R \text{ (W) Equação 94}$$

onde:

A_R É a área de absorção sonora equivalente do compartimento receptor (m^2);

$P_{rms,S}$ É a pressão sonora eficaz (ver ponto 2.2) no compartimento emissor (N/m^2).

^{xix} Considera-se a área do elemento de separação e não a área do elemento i do compartimento emissor, pois se todos os coeficientes de transmissão sonora forem calculados considerando uma área comum, torna-se possível somar directamente todos os coeficientes de transmissão sonora.

$P_{rms,R,ij}$ É a pressão sonora eficaz (ver ponto 2.2) no compartimento receptor devido apenas à transmissão marginal (N/m^2).

ρ_0 É a densidade do ar em equilíbrio (meio de propagação sonora) ($1,2 \text{ kg/m}^3$);

c É a velocidade do som no ar ($c = 340 \text{ m/s}$)

De modo a poder representar R_{ij} em função das propriedades dos elementos i e j , é necessário relembrar o factor de radiação sonora (ver ponto 2.11.1).

Como referido em 2.11.1, por definição o factor de radiação sonora é dado por:

$$\sigma = \frac{W_{rad}}{\rho_0 c S u_{rms}^2} \text{ Equação 95}$$

$$W_{rad} = \rho_0 c S u_{rms}^2 \sigma \text{ (W) Equação 96}$$

onde:

W_{rad} É a potência sonora radiada pelo elemento em vibração.

S É a área do elemento em vibração.

u_{rms}^2 É a amplitude de velocidade média na superfície do elemento.

Podemos então escrever a potência sonora radiada através do elemento j para o compartimento receptor devido à transmissão de vibração do elemento i do compartimento emissor, como:

$$W_{ij} = \rho_0 c S u_{rms,j}^2 \sigma_j \text{ (W) Equação 97}$$

Igualando a Equação 96 à Equação 93, ficamos com:

$$P_{rms,Rij}^2 = \frac{4 \rho_0^2 c^2 S_j u_{rms,j}^2 \sigma_j}{A_r} \text{ Equação 98}$$

Para o compartimento emissor é possível escrever equações semelhantes à Equação 97 e à Equação 98.

O coeficiente de transmissão sonora do elemento i do compartimento emissor, pode então ser escrito como:

$$\tau_i = \frac{W_t}{W_i} \Leftrightarrow \tau_i = \frac{\rho_0 c S_i u_{rms,i}^2 \sigma_i}{W_s} \text{ Equação 99}$$

onde:

W_t É a potência sonora transmitida pelo elemento i do compartimento emissor.

W_i É a potência sonora incidente no elemento i do compartimento emissor.

Substituindo a Equação 93 na Equação 99, e considerando $S_s = S_i$, ficamos com:

$$\tau_i = \frac{\rho_0 c S_i u_{rms,i}^2 \sigma_i}{\frac{P_{rms,S}^2}{4\rho_0 c} S_s} \Leftrightarrow P_{rms,S}^2 = \frac{4\rho_0^2 c^2 u_{rms,i}^2 \sigma_i}{\tau_i} \text{ Equação 100}$$

Podemos então finalmente escrever R_{ij} como sendo igual a:

$$\begin{aligned} R_{ij} &= 10 \lg \left(\frac{W_s}{W_{ij}} \right) \Leftrightarrow R_{ij} = 10 \lg \left(\frac{\frac{4\rho_0^2 c^2 u_{rms,i}^2 \sigma_i}{\tau_i} S_s}{\frac{4\rho_0^2 c^2 S_j u_{rms,j}^2 \sigma_j}{\frac{A_r}{4\rho_0 c}} A_R} \right) \Leftrightarrow R_{ij} = 10 \lg \left(\frac{\frac{\rho_0 c u_{rms,i}^2 \sigma_i}{\tau_i} S_s}{\frac{\rho_0 c S_j u_{rms,j}^2 \sigma_j}{A_r} A_R} \right) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow R_{ij} = 10 \lg \left(\frac{u_{rms,i}^2 \sigma_i}{\tau_i S_j u_{rms,j}^2 \sigma_j} S_s \right) \Leftrightarrow R_{ij} = 10 \lg \left(\frac{1}{\tau_i} \right) + 10 \lg \left(\frac{u_{rms,i}^2}{u_{rms,j}^2} \right) + 10 \lg \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_j} \right) + 10 \lg \left(\frac{S_s}{S_j} \right) \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow R_{ij} = R_i + 10 \lg \left(\frac{u_{rms,i}^2}{u_{rms,j}^2} \right) + 10 \lg \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_j} \right) + 10 \lg \left(\frac{S_s}{S_j} \right) \text{ (dB) Equação 101} \end{aligned}$$

O segundo termo da Equação 101, $10 \lg \left(\frac{u_{rms,i}^2}{u_{rms,j}^2} \right)$, indica a diferença, quando o elemento i é

posto a vibrar, entre a velocidade média na superfície do elemento marginal no compartimento emissor i e o elemento marginal no compartimento receptor j . Costuma ser denominado por “diferença do nível de velocidade na junção entre os elementos de compartimentação” i e j : $D_{v,ij}$.

A Equação 101 pode então ser escrita como:

$$R_{ij} = R_i + D_{v,ij} + 10 \lg \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_j} \right) + 10 \lg \left(\frac{S_s}{S_j} \right) \text{ (dB) Equação 102}$$

Verifica-se assim que a Equação 102 é equivalente à Equação 25 c) constante da ISO 12354-1 [ref. 7].

Contudo, e de acordo com a ISO 12354-1 [ref. 7], como a diferença de nível de velocidade na junção não é uma quantidade invariante e como os factores de radiação são normalmente desconhecidos, é preferível nas previsões de R_{ij} utilizar uma equação equivalente à equação 34, equação 35 seguinte:

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \lg \left(\frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \right) \text{ (dB) Equação 103}$$

No caso de ser aplicado um revestimento adicional a qualquer um dos elementos de compartimentação, o acréscimo de isolamento sonoro obtido por aplicação desse revestimento deverá ser considerado. A Equação 103 pode então ser generalizada de modo a incluir este acréscimo de isolamento sonoro:

$$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \lg \left(\frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \right) \text{ (dB) Equação 104}$$

onde:

$R_{i,situ}$	É o índice de redução sonora <i>in situ</i> para o elemento <i>i</i> situado no compartimento emissor (dB).
$\Delta R_{i,situ}$	É o acréscimo de isolamento sonoro por introdução de um revestimento adicional, colocado no elemento adjacente do espaço emissor (dB).
$R_{j,situ}$	É o índice de redução sonora <i>in situ</i> para o elemento <i>j</i> situado no compartimento receptor (dB).
$\Delta R_{j,situ}$	É o acréscimo de isolamento sonoro por introdução de um revestimento adicional, colocado no elemento adjacente do espaço receptor (dB).
S_s	É a área do elemento de separação (m ²).
S_i	É a área do elemento <i>i</i> (m ²).
S_j	É a área do elemento <i>j</i> (m ²).
$\overline{D_{v,ij,situ}}$	É a diferença direccional média do nível de velocidade na junção entre os elementos de compartimentação <i>i</i> e <i>j</i> (dB).

De acordo com a ISO 12354-1 [ref. 7], $\overline{D_{v,ij,situ}}$ pode ser calculada a partir de:

$$\overline{D_{v,ij,situ}} = k_{ij} - 10 \lg \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_{i,situ} a_{j,situ}}}; \overline{D_{v,ij,situ}} \geq 0 \text{ (dB) Equação 105}$$

com:

k_{ij} É o índice de redução da transmissão de vibração para o caminho ij (dB) (ver ponto 5.4).

com:

$$a_{i,situ} = \frac{2,2\pi^2 S_i}{c_0 T_{s,i,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \text{ (m) Equação 106;}$$

$$a_{j,situ} = \frac{2,2\pi^2 S_j}{c_0 T_{s,j,situ}} \sqrt{\frac{f_{ref}}{f}} \text{ (m) Equação 107}$$

onde:

$a_{i,situ}$ É o comprimento de absorção equivalente do elemento i em condições de aplicação in situ (m).

$a_{j,situ}$ É o comprimento de absorção equivalente do elemento j em condições de aplicação in situ (m).

f É a frequência central da banda em consideração.

f_{ref} É a frequência de referência ($f_{ref} = 1000 \text{ Hz}$).

c_0 É a velocidade de propagação do som no ar (m/s).

l_{ij} É o comprimento da junção entre os elementos i e j .

Para os seguintes elementos de compartimentação:

- Divisórias aligeiradas duplas, tais como painéis de aglomerado de madeira.
- Divisórias com amortecimento interno maior do que 0,03.
- Divisórias que sejam muito mais leves (num factor de 3) que os elementos adjacentes.
- Divisórias que não estejam ligadas rigidamente aos elementos envolventes.

Pode-se considerar:

$$a_{i,situ} = \frac{S_i}{l_0} \text{ (m) Equação 108}$$

$$a_{j,situ} = \frac{S_j}{l_0} \text{ (m) Equação 109}$$

onde:

l_0 é o comprimento de referência ($l_0 = 1 \text{ m}$)

Para outros tipos de elementos de compartimentação o valor de $T_{s,situ}$ deverá ser tido em conta.

Como primeira aproximação a ISO 12354-1 [ref. 7] indica que:

1. Todos os termos dependentes do tempo de reverberação estrutural deverão ser tomados como 0 dB.
2. No cálculo dos comprimentos de absorção equivalente, $a_{i,situ}$ e $a_{j,situ}$, devem ser consideradas a Equação 108 e a Equação 109.

Nestas condições a Equação 104 pode ser escrita como:

$$R_{ij} = \frac{R_i}{2} + \Delta R_i + \frac{R_j}{2} + \Delta R_j + k_{ij} + 10 \lg \left(\frac{S_s}{l_0 l_{ij}} \right) \text{ (dB) Equação 110}$$

onde:

- | | |
|--------------|---|
| R_i | É o índice de redução sonora determinado em laboratório ou por modelação para o elemento i situado no compartimento emissor (dB). |
| ΔR_i | É o acréscimo de isolamento sonoro, determinado em laboratório ou por modelação, por introdução de um revestimento adicional colocado no elemento adjacente do espaço emissor (dB). |
| R_j | É o índice de redução sonora determinado em laboratório ou por modelação para o elemento j situado no compartimento receptor (dB). |

ΔR_j É o acréscimo de isolamento sonoro, determinado em laboratório ou por modelação, por introdução de um revestimento adicional, colocado no elemento adjacente do espaço receptor (dB).

4.2.1.3. Valores *in situ*

De acordo com a ISO 12354-1 [ref. 7] os valores de redução sonora *in situ* podem ser obtidos a partir dos valores de redução sonora determinados em laboratório ou determinados por modelação a partir de:

$$R_{situ} = R - 10 \lg \frac{T_{s,situ}}{T_{s,lab}} \text{ (dB)} \text{ Equação 111}$$

onde:

R_{situ} É o índice de redução sonora de determinado elemento quando aplicado *in situ* (dB)

R É o índice de redução sonora de determinado elemento quando determinado condições de laboratório ou por modelação (dB).

$T_{s,situ}$ É o tempo de reverberação estrutural do elemento quando aplicado *in situ* (s).

$T_{s,lab}$ É o tempo de reverberação estrutural do elemento quando aplicado em condições de laboratório (s).

O tempo de reverberação estrutural é uma medida idêntica ao tempo de reverberação numa sala, ou seja é uma medida do decaimento de energia ao longo do tempo.

Assim, se o tempo de reverberação estrutural do elemento quando aplicado *in situ* for superior ao tempo de reverberação estrutural do elemento quando aplicado em laboratório, significa que a quando aplicado *in situ*, o elemento vibra durante mais tempo o que faz com que seja radiada mais energia acústica.

4.2.1.4. Dados de entrada

Dos pontos anteriores verifica-se que, considerando o modelo detalhado, o índice de redução sonora para as transmissões que ocorrem por via estrutural pode ser determinado a partir do conhecimento dos seguintes dados de entrada:

R_s	Índice de redução sonora determinado em laboratório ou por modelação para o elemento de separação.
R_i	Índice de redução sonora determinado em laboratório ou por modelação para o elemento i situado no compartimento emissor (dB);
R_j	Índice de redução sonora determinado em laboratório ou por modelação para o elemento j situado no compartimento receptor (dB);
ΔR_i	É o acréscimo de isolamento sonoro, determinado em laboratório ou por modelação, por introdução de um revestimento adicional colocado no elemento adjacente do espaço emissor (dB);
ΔR_j	É o acréscimo de isolamento sonoro, determinado em laboratório ou por modelação, por introdução de um revestimento adicional, colocado no elemento adjacente do espaço receptor (dB);
$T_{s,situ}$	Tempo de reverberação estrutural do elemento quando aplicado <i>in situ</i> (s).
$T_{s,lab}$	Tempo de reverberação estrutural do elemento quando aplicado em condições de laboratório (s).
k_{ij}	Índice de redução da transmissão de vibração para o caminho ij (dB).
S_s	Área do elemento do elemento de separação (m ²);
S_i	Área do elemento i (m ²);
S_j	Área do elemento j (m ²).

Sempre que possível deverão ser considerados dados acústicos obtidos em laboratórios credenciados.

Caso não existam dados acústicos para um determinado elemento, de acordo com a ISO 12354-1 [ref. 7] poderão ser deduzidos a partir de diversos métodos de cálculo apresentados no ponto 5.

- Ponto 5.1.1 Cálculo do índice de redução sonora para elementos homogéneos (R_s , R_i , R_j).
- Ponto 5.2 Cálculo do acréscimo de isolamento sonoro por acrescento de novo pano de divisória (ΔR_i , ΔR_j).
- Ponto 5.3 Cálculo dos tempos de reverberação estrutural ($T_{s,situ}$, $T_{s,lab}$).
- Ponto 5.4 Cálculo dos índices de redução da transmissão de vibração (k_{ij}).

4.2.1.5. Limitações na aplicação do modelo de cálculo detalhado

Como visto nos pontos anteriores, o modelo de cálculo detalhado considera que a energia sonora radiada por um elemento estrutural pode ser considerada como o somatório da transmissão sonora por via estrutural que se dá segundo diversos caminhos.

Ou seja, cada caminho pode ser identificado por um elemento i situado no compartimento emissor no qual a energia sonora incide e por um elemento radiante j situado no compartimento receptor.

Viu-se ainda que a passagem de energia do elemento i para o elemento j é função da diferença de nível de velocidade na junção, que por sua vez depende do índice de redução da transmissão de vibração.

Estas aproximações introduzem as seguintes limitações na aplicação do modelo:

1. O modelo só pode ser utilizado para combinações de elementos em que se conheça os índices de redução da transmissão de vibração;
2. Só pode ser utilizado em elementos estruturais simples, ou seja em elementos que apresentem as mesmas características de radiação sonora em ambos os lados;
3. Pavimentos com colunas ou com divisórias leves internas não podem ser considerados como elementos independentes, o modelo de cálculo poderá ser utilizado nestes casos apenas como uma aproximação grosseira;
4. As contribuições de transmissões sonoras compostas por mais do que um caminho de transmissão não são consideradas pelo modelo. Esta limitação é compensada quando os valores dos índices de redução da transmissão de vibração são obtidos por via experimental, nos restantes casos pode levar a uma subestimação da transmissão marginal.
5. O modelo aplica-se apenas a compartimentos adjacentes.

4.2.2. Modelo de cálculo simplificado

Como referido em 4 o modelo simplificado apenas permite o cálculo de R' aos 500 Hz.

Este valor denomina-se por índice de redução sonora aparente ponderado (R'_w) e é calculado a partir dos índices de redução sonora ponderados dos elementos envolvidos.

A ponderação é efectuada de acordo com o descrito em 3.4.7.

No modelo simplificado a Equação 90 é reescrita e o índice de redução sonora aparente ponderado entre dois compartimentos é calculado a partir de:

$$R'_w = -10 \lg \left[10^{\frac{R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{\frac{R_{Df,w}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{R_{Fd,w}}{10}} \right] \text{ (dB) Equação 112}$$

onde:

$R_{Dd,w}$	É o índice de redução sonora ponderado para transmissões directas, caminho Dd , (dB).
$R_{Ff,w}$	É o índice de redução sonora ponderado marginal para o caminho Ff (dB).
$R_{Df,w}$	É o índice de redução sonora ponderado marginal para o caminho Df (dB).
$R_{Fd,w}$	É o índice de redução sonora ponderado marginal para o caminho Fd (dB).
n	É o número de elementos adjacentes do compartimento.

O índice de redução sonora ponderado para transmissões directas pode ser determinado a partir de:

$$R_{Dd,w} = R_{s,w} \text{ (dB) Equação 113}$$

onde:

$R_{s,w}$	É o índice de redução sonora ponderado do elemento de separação (dB).
-----------	---

Os índices de redução sonora ponderados para os diferentes elementos adjacentes ao elemento de separação podem ser calculados a partir de:

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \text{ (dB) Equação 114}$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{s,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \text{ (dB) Equação 115}$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{s,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \lg \frac{S_s}{l_0 l_f} \text{ (dB) Equação 116}$$

onde:

$R_{F,w}$	É o índice de redução sonora ponderado do elemento adjacente F , no compartimento emissor (dB).
$R_{f,w}$	É o índice de redução sonora ponderado do elemento adjacente f , no compartimento receptor (dB).
$\Delta R_{Ff,w}$	É o acréscimo de isolamento sonoro, por introdução de revestimento adicional, colocado nos elementos adjacentes do espaço emissor e/ou receptor (dB).
$\Delta R_{Fd,w}$	É o acréscimo de isolamento sonoro, por introdução de revestimento adicional, colocado no elemento adjacente do espaço emissor e/ou colocado no elemento de separação no espaço receptor (dB).
$\Delta R_{Df,w}$	É o acréscimo de isolamento sonoro, por introdução de revestimento adicional, colocado no elemento de separação do espaço emissor e/ou colocado no elemento adjacente no espaço receptor (dB).
K_{Ff}	É o índice de redução de transmissão de vibrações pelo caminho Ff (dB).
K_{Fd}	É o índice de redução de transmissão de vibrações pelo caminho Fd (dB).
K_{Df}	É o índice de redução de transmissão de vibrações pelo caminho Df (dB).
S_s	É a superfície do elemento de separação (m ²).
l_f	É o comprimento da linha de junção entre o elemento de separação e os elementos adjacentes F e f (m).
l_0	É o comprimento da linha de junção de referência ($l_0=1$ m).

4.2.2.1. Dados de entrada

Dos pontos anteriores verifica-se que, considerando o modelo simplificado, o índice de redução sonora para as transmissões que ocorrem por via estrutural pode ser determinado a partir do conhecimento dos seguintes dados de entrada:

$R_{s,w}; R_{F,w}; R_{f,w}$	Índices de redução sonora ponderada para os elementos.
$\Delta R_{Dd,w}; \Delta R_{Ff,w}; \Delta R_{Fd,w}; \Delta R_{Df,w}$	Acréscimo de isolamento sonoro por introdução de revestimentos adicionais.
$K_{Ff}; K_{Fd}; K_{Df}$	Índice de redução de transmissão de vibrações para cada um dos caminhos de transmissão.

À semelhança do modelo detalhado deverão ser utilizados, sempre que possível, dados acústicos obtidos em laboratórios credenciados.

Caso não existam dados acústicos para um determinado elemento, de acordo com a ISO 12354-1 [ref. 7] poderão ser obtidos a partir de diversos métodos de cálculo apresentados no ponto 5.

- Ponto 5.1.2 Cálculo do índice de redução sonora para elementos homogéneos ($R_{s,w}; R_{F,w}; R_{f,w}$).
- Ponto 5.2 Cálculo do acréscimo de isolamento sonoro por acrescento de novo pano de divisória ($\Delta R_{Dd,w}; \Delta R_{Ff,w}; \Delta R_{Fd,w}; \Delta R_{Df,w}$).
- Ponto 5.4 Cálculo dos índices de redução da transmissão de vibração ($K_{Ff}; K_{Fd}; K_{Df}$).

4.2.2.2. Limitações na aplicação do modelo de cálculo simplificado

As limitações descritas para o modelo detalhado aplicam-se também ao modelo simplificado. O modelo simplificado aplica-se fundamentalmente a compartimentos com elementos de dimensão semelhante à dimensão dos elementos de teste de laboratório. O modelo assume que os elementos apresentam índices de redução sonora que não dependem da frequência, pelo que em elementos que apresentem uma clara dependência da frequência o modelo torna-se pouco preciso.

5. OBTENÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

5.1. ÍNDICE DE REDUÇÃO SONORA PARA ELEMENTOS HOMOGÉNEOS

5.1.1. Modelo de cálculo detalhado

O índice de redução sonora para elementos estruturais monolíticos medido em laboratório pode ser calculado, de acordo com o Anexo B da ISO 12354-1 [ref. 7], a partir das seguintes expressões (como seria de esperar, existem diferentes expressões em função da localização das frequências a analisar. Esta localização é naturalmente dada com base na frequência crítica - ver ponto 2.9.3):

$$R = -10 \lg \tau \quad \text{Equação 117}$$

$$f > f_c \quad \tau = \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi f_{c,eff} \sigma^2}{2 f \eta_{Tot}} \quad \text{Equação 118}$$

$$f = f_c \quad \tau = \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \frac{\pi \sigma^2}{2 f \eta_{Tot}} \quad \text{Equação 119}$$

$$f < f_c \quad \tau = \left(\frac{2\rho_0 c_0}{2\pi f m'} \right)^2 \left(2\sigma_f + \frac{(l_1 + l_2)^2}{l_1^2 + l_2^2} \sqrt{\frac{f_c}{f}} \frac{\sigma^2}{\eta_{Tot}} \right) \quad \text{Equação 120}$$

com:

$$l_1 > l_2 \quad \text{Equação 121}$$

$$f_c = \frac{c^2}{1,8 c_L t} \quad (\text{Hz}) \quad \text{Equação 122}$$

$$c_L = \sqrt{\frac{E_1}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (\text{m/s}) \quad \text{Equação 123}$$

$$f < f_p \quad f_{c,eff} = f_c \left(4,05 \frac{tf}{c_L} + \sqrt{1 + \left(4,05 \frac{tf}{c_L} \right)^2} \right) \quad (\text{Hz}) \quad \text{Equação 124}$$

$$f \geq f_p \quad f_{c,eff} = 2f_c \left(\frac{f}{f_p} \right)^3 \quad (\text{Hz}) \quad \text{Equação 125}$$

$$f_p = \frac{c_L}{5,5t} \quad (\text{Hz}) \quad \text{Equação 126}$$

onde:

τ	É o coeficiente de transmissão sonora.
m'	É a massa por unidade de área (kg/m^2).
f	É a frequência (Hz).
f_c	É a frequência crítica (ver ponto 2.9.3) (Hz).
c	É a velocidade do som no ar (340 m/s).
c_L	É a velocidade de propagação das ondas longitudinais (m/s).
t	É a espessura do elemento (m).
E_1	É módulo de Young do elemento (N/m^2).
ν	É o coeficiente de Poisson.
ρ	É densidade do elemento (kg/m^3).
η_{Tot}	É o factor de amortecimento total.
σ	É o factor de radiação.
σ_f	É o factor de radiação para transmissão forçada.
l_1, l_2	É o comprimento dos contornos do elemento (m).

O cálculo de η_{Tot} em laboratório é no Anexo C da ISO 12354-1 [ref. 7], e pode, para a generalidade dos elementos comuns de construção ser dado por:

$$\eta_{Tot} = \eta_{int} + \frac{m'}{485\sqrt{f}} \quad \text{Equação 127}$$

onde:

η_{int} É o factor de amortecimento interno ($\approx 0,01$ para elementos homogéneos)

O cálculo do factor de radiação para transmissão forçada é efectuado a partir de:

$$\sigma_f = 0,5 \left[\ln(k_0 \sqrt{l_1 l_2}) - \Lambda \right] \quad ; \quad \sigma_f \leq 2 \quad \text{Equação 128}$$

$$\Lambda = -0,964 - \left(0,5 + \frac{l_2}{\pi l_1} \right) \ln \frac{l_2}{l_1} + \frac{5l_2}{2\pi l_1} - \frac{1}{4\pi l_1 l_2 k_0^2} \quad \text{Equação 129}$$

onde:

k_0 É o numero de onda ($k_0 = (2\pi f)/c$) (m^{-1})

O factor de radiação para ondas de flexão que se propagam livremente é calculado a partir de uma das seguintes expressões:

$$\sigma_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{f_c}{f}}} \quad \text{Equação 130}$$

$$\sigma_2 = 4l_1l_2 \left(\frac{f}{c} \right)^2 \quad \text{Equação 131}$$

$$\sigma_3 = \sqrt{\frac{2\pi f(l_1 + l_2)}{16c}} \quad \text{Equação 132}$$

Considerando, de acordo com a norma, $f_{11} = \frac{c^2}{4f_c} \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} \right)$ (modo de vibração – ver ponto 2.9.3)

Se $f_{11} \leq f_0/2$ então:

$$f \geq f_c \quad \sigma = \sigma_1 \quad \text{Equação 133}$$

$$f < f_c \quad \sigma = \frac{2(l_1 + l_2)}{l_1l_2} \frac{c}{f_c} \delta_1 + \delta_2 \quad \text{Equação 134}$$

com

$$\delta_1 = \frac{(1 - \lambda^2) \ln \frac{1 + \lambda}{1 - \lambda} + 2\lambda}{4\pi^2 (1 - \lambda^2)^{1.5}} \quad \text{Equação 135}$$

e

$$\lambda = \sqrt{\frac{f}{f_c}} \quad \text{Equação 136}$$

se $f > f_0/2$ então:

$$\delta_2 = 0 \quad \text{Equação 137}$$

se $f \leq f_0/2$ então:

$$\delta_2 = \frac{8c^2(1 - 2\lambda^2)}{f_c^2 \pi^4 l_1 l_2 \lambda \sqrt{1 - \lambda^2}} \quad \text{Equação 138}$$

Se $f_{11} > f_d/2$ então:

$$f < f_c \text{ e } (\sigma < \sigma_2) \quad \sigma = \sigma_2; \text{ Com } \sigma \leq 2 \text{ Equação 139}$$

$$f > f_c \text{ e } (\sigma_2 < \sigma_3) \quad \sigma = \sigma_1; \text{ Com } \sigma \leq 2 \text{ Equação 140}$$

$$f = f_c \quad \sigma = \sigma_3; \text{ Com } \sigma \leq 2 \text{ Equação 141}$$

5.1.2. Modelo de cálculo simplificado

O índice de redução sonora ponderado para elementos homogêneos de betão ou alvenaria, rebocados ou não, pode ser calculado a partir das seguintes expressões:

EN 12354-1	$m' > 150 \text{ kg/m}^2$	$R_w = 37,5 \lg(m'/m'_0) - 42,0 \text{ (dB)}$ Equação 142
------------	---------------------------	---

Norma Britânica	$m' > 50 \text{ kg/m}^2$	$R_w = 21,65 \lg(m'/m'_0) - 2,3 \pm 1 \text{ (dB)}$ Equação 143
-----------------	--------------------------	---

Norma Alemã	$m' > 100 \text{ kg/m}^2$	$R_w = 32,4 \lg(m'/m'_0) - 26,0 \text{ (dB)}$ Equação 144
-------------	---------------------------	---

Norma Francesa	$m' > 150 \text{ kg/m}^2$	$R_w = 40,0 \lg(m'/m'_0) - 45,0 \text{ (dB)}$ Equação 145
----------------	---------------------------	---

onde:

m' É a massa por unidade de área (kg/m^2).

m'_0 É a massa por unidade de área de referência, $m'_0 = 1 \text{ kg/m}^2$.

5.2. CÁLCULO DO ACRÉSCIMO DE ISOLAMENTO SONORO DEVIDO À INTRODUÇÃO DE REVESTIMENTOS ADICIONAIS

Se forem fixados revestimentos adicionais a um elemento estrutural simples homogêneo, o isolamento sonoro a sons de condução aérea pode aumentar ou diminuir consoante a frequência de ressonância do sistema composto.

Para sistemas com revestimento adicional fixado directamente ao elemento estrutural, a frequência de ressonância do sistema composto pode ser calculada a partir de:

$$f_0 = 160 \sqrt{S' \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \text{ (Hz)} \text{ Equação 146}$$

onde:

S' É a elasticidade dinâmica (MN/m³)

m'_1 É a massa por unidade de área do elemento estrutural (kg/m²);

m'_2 É a massa por unidade de área do pano adicional (kg/m²);

Para sistemas com pano adicional não fixado directamente ao elemento estrutural e cuja caixa de ar é preenchida por um material poroso com uma resistividade ao ar $\rho \geq 5 \text{ kPa s/m}^2$, a frequência de ressonância é dada por:

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0,111}{d} \left(\frac{1}{m'_1} + \frac{1}{m'_2} \right)} \text{ (Hz) Equação 147}$$

onde:

d É a espessura da caixa de ar (m).

Para elementos estruturais com isolamento sonoro ponderado na gama de $20 \text{ dB} \leq R_W \leq 60 \text{ dB}$, o acréscimo de isolamento sonoro (ΔR_W) devido à inclusão de novos panos pode ser estimado a partir da frequência de ressonância f_0 (arredondada ao inteiro mais próximo), de acordo com a Tabela 5.1.

Para frequências de ressonância menores que 200 Hz o valor ΔR_W depende também do isolamento sonoro ponderado (R_W) do elemento estrutural, esta dependência é ilustrada na Figura 5.1.

Tabela 5.1 ΔR_W em função de f_0

Frequência de Ressonância f_0 (Hz)	ΔR_W (dB)
≤ 80	$35 - R_W/2$
100	$32 - R_W/2$
125	$30 - R_W/2$
160	$28 - R_W/2$
200	-1
250	-3
315	-5
400	-7
500	-9
630-1600	-10
> 1600	-5

NOTA 1 Para frequências de ressonância inferiores a 200 Hz o valor mínimo de ΔR_W é 0 dB.

NOTA 2 Valores de ΔR_W para frequências intermédias podem ser deduzidos por interpolação linear sobre o logaritmo da frequência.

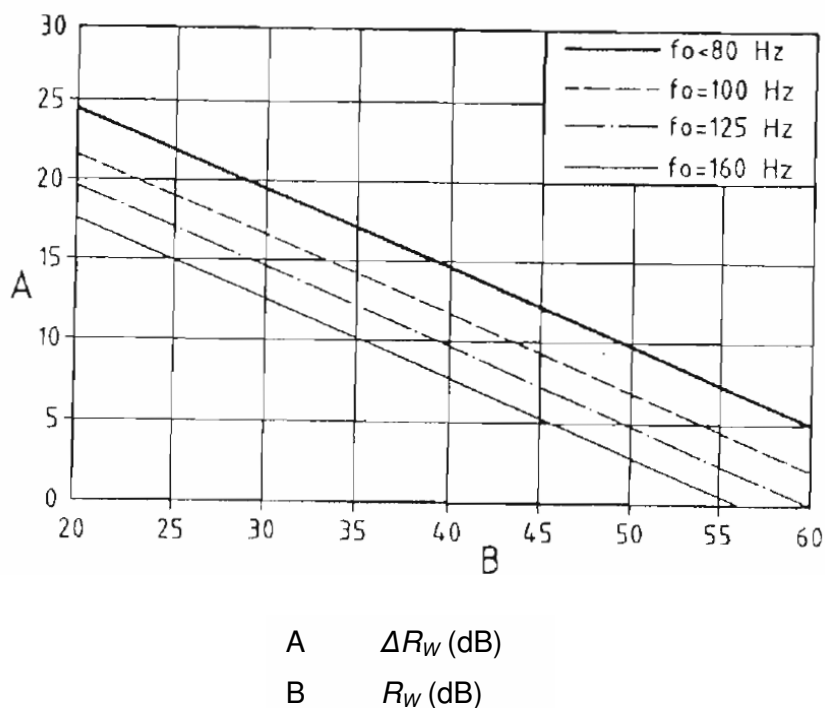


Figura 5.1 ΔR_W em função de f_0 para frequências de ressonância inferiores a 200 Hz

5.3. TEMPOS DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL

O tempo de reverberação estrutural do elemento T_s pode ser estimado com base no factor de amortecimento total, que provém das perdas internas, das perdas por radiação (normalmente podem ser desprezadas) e das perdas no perímetro do elemento:

$$T_s = \frac{2,2}{f\eta_{Tot}} \text{ (s) Equação 148}$$

$$\eta_{Tot} = \eta_{int} + \frac{2\rho_0 c \sigma}{2\pi f m'} + \frac{c}{\pi^2 S \sqrt{f \cdot f_c}} \sum_{K=1}^4 l_K \alpha_K \text{ Equação 149}$$

onde:

- η_{Tot} É o factor de amortecimento total;
- f É a frequência (Hz);
- η_{int} É o factor de amortecimento interno ($\approx 0,01$ para elementos homogéneos);
- m' É a massa por unidade de área (kg/m^2);
- f_c É a frequência crítica (Hz);
- S É a área do elemento de separação;
- α_K É o coeficiente de absorção para ondas de flexão no perímetro K;
- l_K É o comprimento da junção no perímetro K (m);
- c É a velocidade do som no ar (340 m/s);
- ρ_0 É a densidade do ar ($1,2 \text{ kg/m}^3$);

Para cálculos em 1/3 de oitava a frequência que deve ser tida em conta é a frequência central. Para cálculos em oitavas a melhor aproximação é obtida considerando-se a frequência central correspondente à menor banda de 1/3 de oitava dentro da banda de oitava considerada.

5.3.1. Valores in situ

Os coeficientes de absorção dependem da situação e dos elementos estruturais existentes no perímetro. Em situações *in situ* variam entre 0,05 e 0,5.

Podem ser calculados, para elemento i , a partir do índice de amortecimento de vibrações (K_{ij}) na junção entre o elemento i e o elemento j .

$$\alpha_K = \sum_{j=1}^3 \sqrt{\frac{f_{c,j}}{f_{ref}}} 10^{\frac{-K_{ij}}{10}} \quad \text{Equação 150}$$

onde:

f_c É a frequência crítica (Hz);

f_{ref} É a frequência de referência (1000 Hz);

5.3.2. Valores de laboratório

Em laboratório o coeficiente de absorção médio, como especificado na ISO 140-1 [ref. 11] é cerca de 0,15 para construções pesadas ($\approx 400 \text{ kg/m}^2$). Para esta situação α_K pode ser calculado a partir de:

$$\alpha_K = \alpha(1 - 0,9999\alpha) \quad \text{Equação 151}$$

com:

$$\alpha = \frac{1}{3} \left[\frac{2\sqrt{X\psi}(1+X)(1+\psi)}{X(1+\psi)^2 + 2\psi(1+X^2)} \right]^2 \quad \text{Equação 152}$$

$$X = \sqrt{\frac{31,1}{f_c}} \quad \text{Equação 153}$$

$$\psi = 44,3 \frac{f_c}{m'} \quad \text{Equação 154}$$

Por fim o factor de amortecimento total em laboratório pode ser calculada a partir de:

$$\eta_{Tot} = \eta_{int} + \frac{m'}{485\sqrt{f}} \quad \text{Equação 155}$$

$$m' \leq 800 \text{ kg/m}^2$$

$$\eta_{int} = 0,01$$

5.4. ÍNDICE DE REDUÇÃO DA TRANSMISSÃO DE VIBRAÇÃO

O índice de amortecimento de vibrações, K_{ij} , para os vários tipos de junções que definem a malha de compartimentação do edifício é, de acordo com a Norma 12354-1 [ref. 7], função da quantidade M, relação entre as massas superficiais dos elementos de compartimentação em presença:

$$M = 10 \lg \frac{m'_{\perp i}}{m'_i} \quad \text{Equação 156}$$

onde:

m'_i É a massa por unidade de área do elemento i no caminho de transmissão ij (kg/m²);

$m'_{\perp i}$ É a massa por unidade de área do elemento perpendicular a i (kg/m²);

Podendo no caso dos elementos muito aligeirados, ser também função da frequência.

Os edifícios correntes, tanto de habitação como de ensino e serviços, têm uma malha estrutural e de compartimentação relativamente regular, como tal, a ISO 12354-1 [ref. 7] apenas considera junções tipo X e T, conforme se ilustra esquematicamente na Figura 5.2.

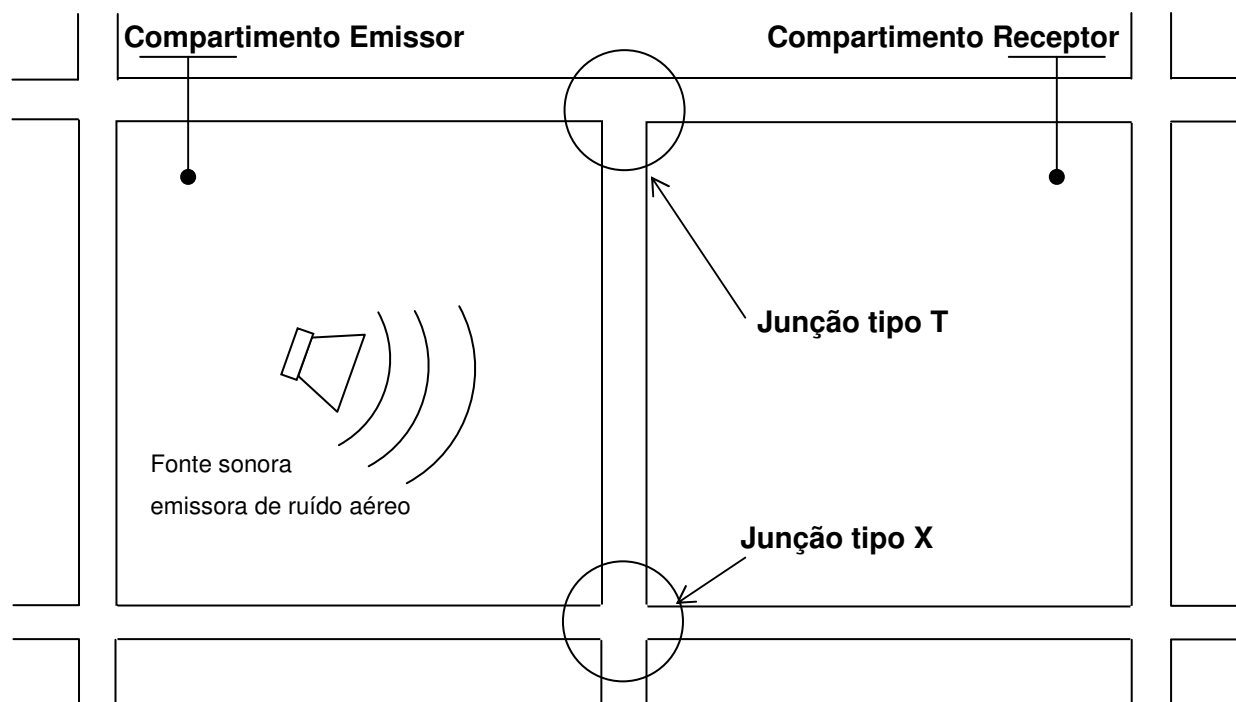
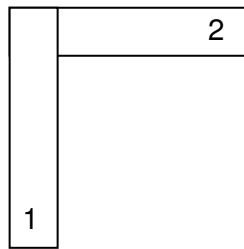


Figura 5.2 Junções tipo X e tipo T

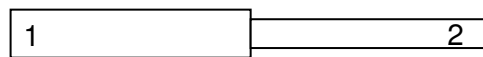
5.4.1.1. Ligações rígidas

Cantos



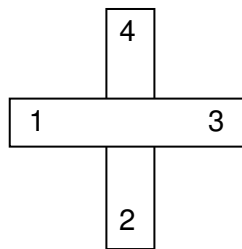
$$k_{12} = 15|M| - 3 = k_{21} \quad (\text{dB}) \text{ valor mínimo } -2 \text{ dB}$$

Mudanças de Espessura



$$k_{12} = 5M^2 - 5 = k_{21} \quad (\text{dB})$$

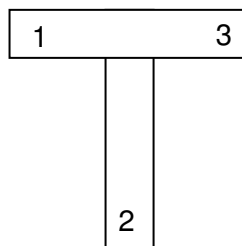
X



$$k_{13} = 8,7 + 17,1M + 5,7M^2 \quad (\text{dB})$$

$$k_{12} = 8,7 + 5,7M^2 = k_{23} \quad (\text{dB})$$

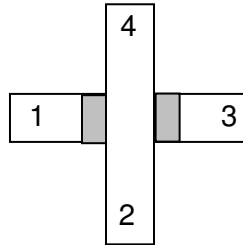
T



$$k_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7M^2 \quad (\text{dB})$$

$$k_{12} = 5,7 + 5,7M^2 = k_{23} \quad (\text{dB})$$

5.4.1.2. Ligações com camadas resilientes



$$k_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7M^2 + 2\Delta_1 \text{ (dB)}$$

$$k_{24} = 3,7 + 14,1M + 5,7M^2 ; 0 \leq K_{24} \leq 4 \text{ (dB)}$$

$$k_{12} = 5,7 + 5,7M^2 + \Delta_1 = k_{23} \text{ (dB)}$$

onde:

$$\Delta_1 = 10 \lg \frac{f}{f_1} ; f > f_1 \text{ (dB)}$$

$$f_1 = 125 \text{ (Hz) se } E_1/t_1 \approx 100 \text{ MN/m}^3$$

6. VALIDAÇÃO DAS FOLHAS DE CÁLCULO

Com base nos modelos de cálculo apresentados nos pontos anteriores foram construídas duas folhas de cálculo (uma de acordo com o modelo de cálculo detalhado outra de acordo com o modelo de cálculo simplificado) para o cálculo do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos.

As folhas de cálculo construídas foram então testadas de modo a aferir a validade dos seus resultados. Para tal foi considerado o exemplo de cálculo apresentado no Anexo H da ISO 12354-1.

A metodologia utilizada na validação das folhas consistiu em passar os dados de entrada do exemplo apresentado na ISO 12354-1 para cada uma das folhas de cálculo. A validação das folhas de cálculo foi então efectuada através da comparação do resultado de R'_w obtido por cada uma das folhas de cálculo e os resultados de R'_w apresentados na ISO 12354-1.

Os pontos seguintes apresentam, para cada uma das folhas de cálculo desenvolvidas, o resultado dessa validação.

6.1. FOLHA COM O MODELO DE CÁLCULO DETALHADO

Caso em estudo: Duas salas contíguas com 50 m³ cada e dimensões descritas na Figura 6.1.

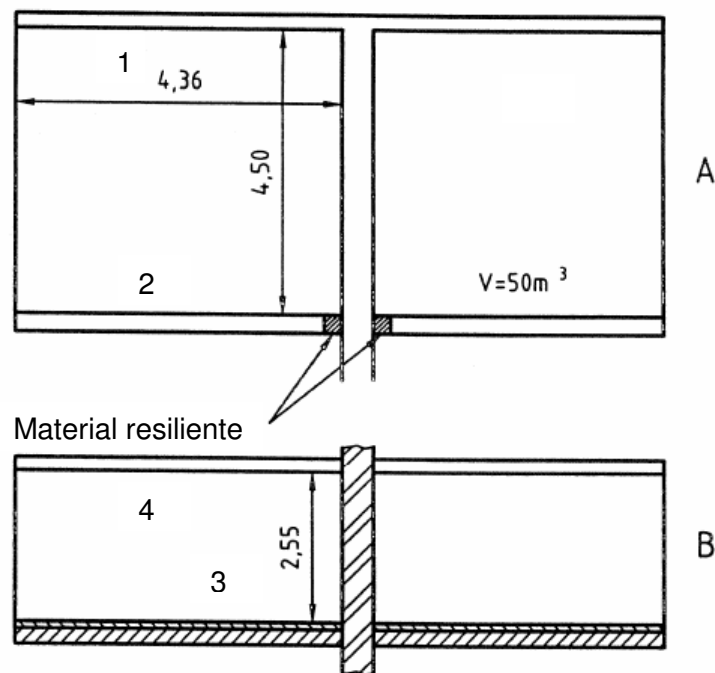


Figura 6.1 Validação do modelo de cálculo detalhado – caso de estudo

Legenda:

A – Planta

B – Corte

Elemento de separação:

S Parede: 4,50 m x 2,50 m = 11,50 m²; Betão com 20 cm de espessura e 460 kg/m²

Elementos marginais:

- F1, f1 Fachada: 4,36 m x 2,55 m = 11,1 m²; ligação rígida em T; Blocos de silicato de cálcio com 10 cm de espessura e 175 kg/m²
- F2, f2 Parede Interna: 4,36 m x 2,55 m = 11,1 m²; ligação em X com camada resiliente; Blocos de gesso com 7 cm de espessura e 67 kg/m².
- F3, f3 Pavimento: 4,36 m x 4,50 m = 19,6 m²; ligação rígida em X; betão com 10 cm de espessura, 3 cm de acabamento e 287 kg/m².
- F4, f4 Tecto: 4,36 m x 4,50 m = 19,6 m²; ligação rígida em X; betão com 10 cm de espessura e 230 kg/m².

A Tabela seguinte apresenta os resultados obtidos com a folha de cálculo.

Tabela 6.1 Validação do modelo de cálculo detalhado – caso de estudo – R'_w

	$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10\lg\left(\frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}}\right)$																
f(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	
<i>R_{D,d}</i>	42	43	45	46	49	52	55	57	60	62	65	67	70	72	74	76	
<i>R_{D,f1}</i>	45	46	48	49	52	55	59	62	65	68	71	74	77	79	82	84	
<i>R_{D,f2}</i>	51	52	53	55	57	59	62	65	68	71	74	76	79	82	84	87	
<i>R_{D,f3}</i>	47	49	51	53	57	60	63	66	68	71	74	76	79	81	84	86	
<i>R_{D,f4}</i>	47	49	51	53	56	60	63	66	68	71	74	76	79	81	84	86	
<i>R_{F1,d}</i>	45	46	48	49	52	55	59	62	65	68	71	74	77	79	82	84	
<i>R_{F1,f1}</i>	41	40	42	44	47	50	54	58	62	65	68	72	75	78	81	84	
<i>R_{F2,d}</i>	51	52	53	55	57	59	62	65	68	71	74	76	79	82	84	87	
<i>R_{F2,f2}</i>	54	55	56	57	59	60	63	66	70	73	76	79	83	85	88	91	
<i>R_{F3,d}</i>	47	49	51	53	57	60	63	66	68	71	74	76	79	81	84	86	
<i>R_{F3,f3}</i>	42	44	47	50	54	57	61	63	66	69	72	74	77	80	82	85	
<i>R_{F4,d}</i>	47	49	51	53	56	60	63	66	68	71	74	76	79	81	84	86	
<i>R_{F4,f4}</i>	44	46	48	51	54	58	62	65	68	71	73	76	79	81	84	86	
$R' = -10\lg\left(10^{\frac{R_{Dd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{R_{Ff}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{\frac{R_{Df}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{R_{Fd}}{10}}\right)$	34	35	37	39	42	45	48	51	54	57	60	62	65	68	70	72	
<i>R'w</i> (ver 4.1.7)	54																

As pequenas variações (± 2 dB) encontradas em algumas bandas de frequência devem-se ao facto de a norma não fornecer para os materiais constituintes dos elementos construtivos o valor das variáveis: i) módulo de *Young*; ii) Coeficiente de *Poisson* e iii) Factor de perdas internas. Estes valores, como se pode verificar no ponto 5.1, influenciam o cálculo do índice de redução sonora ponderado dos elementos construtivos.

No entanto verifica-se que, apesar da presença destas pequenas variações, o valor de R'_w obtido com a folha de cálculo, 54 dB, coincide com o valor de R'_w indicado na norma.

É então possível verificar que os resultados obtidos pela folha de cálculo revelaram uma excelente correlação com os resultados constantes da ISO 12354-1 [ref. 7].

O Anexo A.1, Propriedade dos materiais, apresenta as propriedades dos materiais consideradas.

6.2. MODELO DE CÁLCULO SIMPLIFICADO

Caso em estudo: O mesmo do ponto 6.1.

A Tabela seguinte apresenta os resultados obtidos com a folha de cálculo.

Tabela 6.2 Validação do modelo de cálculo simplificado – caso de estudo – R'_w

		m'	R_w	m'_s/m'_f	$M = \log(m'_s/m'_f)$	Tipo ligação	K_{Ff}	K_{Fd}	K_{Df}
	Elemento	kg/m^2	dB						
Elemento Separação	S	460	58						
Parede Esquerda	F1	175	42	2.63	0.42	T	12.6	6.7	6.7
Parede Direita	F2	67	37	6.87	0.84	Resiliente	33.5	15.7	15.7
Pavimento	F3	287	50	1.60	0.20	Cruz	12.4	8.9	8.9
Tecto	F4	230	47	2.00	0.30	Cruz	14.4	9.2	9.2
Parede Esquerda	f1	175	42	2.63	0.42	T	12.6	6.7	6.7
Parede Direita	f2	67	37	6.87	0.84	Resiliente	33.5	15.7	15.7
Pavimento	f3	287	50	1.60	0.20	Cruz	12.4	8.9	8.9
Tecto	f4	230	47	2.00	0.30	Cruz	14.4	9.2	9.2

Tabela 6.3 Validação do modelo de cálculo simplificado – caso de estudo – R'_w

		Tamanho da junção $l_k(m)$	$10\lg(Ss/l_k)$	Rij dB
S	Dd			58
	Df1	2.55	6.5	63
	Df2	2.55	6.5	70
	Df3	4.5	4.1	67
	Df4	4.5	4.1	66
F1	F1d	2.55	6.5	63
	F1f1	2.55	6.5	61
F2	F2d	2.55	6.5	70
	F2f2	2.55	6.5	77
F3	F3d	4.5	4.1	67
	F3f3	4.5	4.1	67
F4	F4d	4.5	4.1	66
	F4f4	4.5	4.1	65

$$R'_w = -10\lg \left(10^{-\frac{R_{w,Dd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Ff}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Df}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Fd}}{10}} \right) = 53dB$$

O valor de R'_w obtido apresenta uma variação de - 1 dB relativamente ao valor de R'_w indicado na norma.

Esta variação deve-se ao facto de a norma apresentar valores errados como por exemplo os indicados na Figura seguinte.

$R_w = 21,65 \lg(m'/m'_0) - 2,3 \pm 1 = R_w = 21,65 \lg(67/1) - 2,3 = 37 \text{ Db (ver Equação 143)}$

$R_w = 37,5 \lg(m'/m'_0) - 42,0 = 37,5 \lg(230/1) - 42,0 = 47 \text{ dB (ver Equação 142)}$

$R_w = 37,5 \lg(m'/m'_0) - 42,0 = 37,5 \lg(287/1) - 42,0 = 50 \text{ dB (ver Equação 142)}$

$R_w = 37,5 \lg(m'/m'_0) - 42,0 = 37,5 \lg(460/1) - 42,0 = 58 \text{ dB (ver Equação 142)}$

$460/287 = 1,60$

$460/67 = 6,86$

INPUT DATA :	ELEMENTS		JUNCTIONS			
	m' (kg/m ²)	R_w (dB) Annex B	m'_s/m'_t	K_{Ff} (dB)	K_{Fd} (dB)	K_{Df} (dB)
					Annex E	
Wall (s)	460	57				
Floor (F = f = 1)	287	49	1,61	12,4	8,9	8,9
Ceiling (F = f = 2)	230	46	2,00	14,4	9,2	9,2
Façade (F = f = 3)	175	42	2,63	12,6	6,7	6,7
Internal wall (F = f = 4)	67	33	6,97	33,5	15,7	15,7

Figura 6.2 Modelo de cálculo simplificado – Erros encontrados na ISO 12354-1[ref. 7] ^{xx}.

^{xx} Figura retirada da página 61 da ISO 12354-1 [ref. 7].

7. APLICAÇÃO DOS MODELOS DE CÁLCULO A SITUAÇÕES REAIS

Analisa-se nos pontos seguintes a aplicação dos modelos detalhado e simplificado a alguns casos típicos que normalmente são entrados quando da execução de novos projectos acústicos, como por exemplo:

1. Compartimentos de igual dimensão, totalmente sobrepostos, separados por um elemento simples e com transmissão marginal relevante;
2. Compartimentos totalmente sobrepostos separados por um elemento simples e sem transmissão marginal relevante;
3. Compartimentos totalmente sobrepostos separados por elemento duplo;
4. Compartimentos parcialmente sobrepostos.

Alguns dos valores de isolamento sonoro obtidos por aplicação das folhas de cálculo desenvolvidas a situações reais foram comparados com resultados experimentais.

O Anexo A.1, Propriedade dos materiais, apresenta as propriedades dos materiais consideradas nos vários exemplos de modelação apresentados nos pontos seguintes.

7.1. COMPARTIMENTOS DE IGUAL DIMENSÃO - TRANSMISSÃO MARGINAL RELEVANTE

As folhas de cálculo com o modelo detalhado e com o modelo simplificado foram utilizadas para o cálculo do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre dois compartimentos de dimensão semelhante, totalmente sobrepostos e separados por um elemento de separação simples – ver Figura 7.1.

A Tabela 7.1 apresenta os resultados obtidos com o modelo detalhado. A Figura 7.2 apresenta os valores de D_{nT} em função da frequência obtidos experimentalmente e por modelação (modelo detalhado). Já a Tabela 7.2 e a Tabela 7.3 apresentam os resultados obtidos com o modelo simplificado.

A Tabela 7.4 apresenta os valores de $D_{nT,w}$ obtidos por aplicação dos modelos detalhado e simplificado e o respectivo valor obtido experimentalmente. Verifica-se que os resultados

obtidos por modelação revelam uma excelente correlação com os resultados obtidos experimentalmente.

Os valores de D_{nT} em função da frequência (ver Figura 7.2) obtidos pelo modelo detalhado aproximam-se bastante, para a generalidade das bandas de frequência analisadas, e dos valores experimentais. Verifica-se que as maiores diferenças ocorrem nas baixas frequências (frequências abaixo dos 250 Hz) - Figura 7.2. O facto de estas diferenças ocorrerem nas baixas frequências é facilmente compreensível uma vez que nesta gama de frequências a utilização de modelos estatísticos começa a ser questionável, o cálculo da frequência de *Shroeder* (ver ponto 3.1) para o compartimento em causa mostra isso mesmo:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} = 2000 \sqrt{\frac{0,6}{41,6}} = 240 \text{ Hz}$$

Verifica-se (ver Tabela 7.1 e Tabela 7.3) que os encaminhamentos marginais que contêm os elementos 1, 3 e 4 (ver Figura 7.1) são os encaminhamentos mais relevantes para transmissão marginal. Estes encaminhamentos contribuem para a diminuição do isolamento sonoro conferido pelo sistema total (elemento de separação + elementos marginais) em cerca de 4 dB relativamente ao isolamento sonoro conferido pelo elemento de separação isolado. Esta relevância e influência são facilmente compreensíveis pois verifica-se que os elementos 1, 3 e 4 são os elementos mais “fracos” do sistema (elementos com menor massa superficial).

Verifica-se uma excelente correlação entre o valor único, D_{nTW} , obtido experimentalmente e o valor único previsto pelo modelo detalhado (2 dB de diferença), já o valor único previsto pelo modelo simplificado apresenta uma diferença superior, 6 dB, relativamente ao resultado experimental (ver Tabela 7.4).

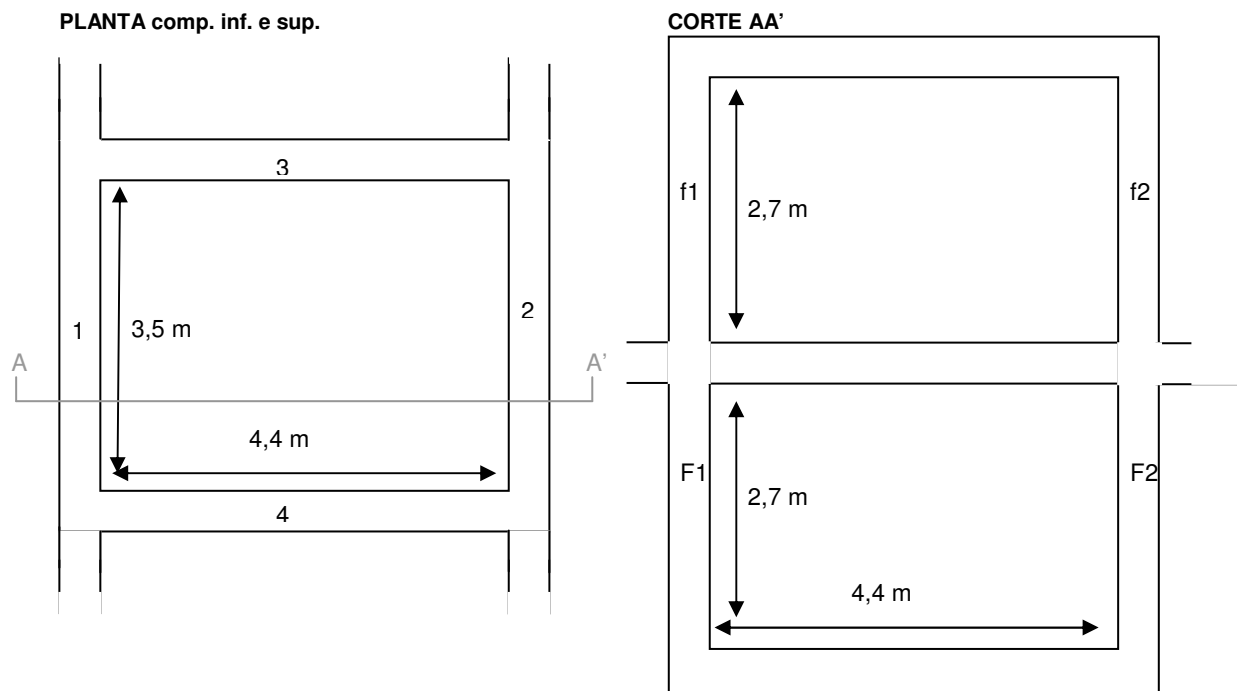


Figura 7.1 Compartimentos de igual dimensão com transmissão marginal relevante – caso de estudo
(Figura sem escala).

Legenda:

Elemento de separação:

S Tecto/Pavimento: 4,4 m x 3,5 m = 15,4 m²; Betão com 24 cm de espessura e 552 kg/m²

Elementos marginais:

- F1 Parede interior: 3,5 m x 2,7 m = 9,45 m²; ligação rígida em X; Tijolo cerâmico furado com 15 cm de espessura e 202 kg/m²
- F2 Fachada: 3,5 m x 2,7 m = 9,45 m²; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura e 270 kg/m²
- F3 Parede frontal: 4,4 m x 2,7 m = 11,88 m²; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 15 cm de espessura e 202 kg/m²
- F4 Parede tardoz: 4,4 m x 2,7 m = 11,88 m²; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 15 cm de espessura e 202 kg/m²
- f1 Parede interior: 3,5 m x 2,7 m = 9,45 m²; ligação rígida em X; Tijolo cerâmico furado com 15 cm de espessura e 202 kg/m²
- f2 Fachada: 3,5 m x 2,7 m = 9,45 m²; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura e 270 kg/m²

f3 Parede frontal: 4.4 m x 2.7 m = 11,88 m²; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 15 cm de espessura e 202 kg/m²

f4 Parede tardoz: 4.4 m x 2.7 m = 11,88 m²; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 15 cm de espessura e 202 kg/m²

Tabela 7.1 Compartimentos de igual dimensão com transmissão marginal relevante – Modelo detalhado – R'_w

	$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \lg \left(\frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \right)$																
f(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	Rw
R_s	44	45	47	49	52	55	57	60	62	65	67	69	72	74	76	77	63
$R_{D,d}$	44	45	47	49	51	54	57	60	62	65	67	69	72	74	76	77	63
$R_{D,f1}$	52	53	56	59	62	65	68	71	74	77	79	82	85	87	90	91	73
$R_{D,f2}$	57	58	60	62	64	67	70	73	75	78	80	83	86	88	90	92	76
$R_{D,f3}$	50	52	54	58	61	64	67	69	72	75	77	80	83	85	87	89	72
$R_{D,f4}$	50	52	54	58	61	64	67	69	72	75	77	80	83	85	87	89	72
$R_{F1,d}$	52	53	56	59	62	65	68	71	74	77	79	82	85	87	90	91	73
$R_{F1,f1}$	51	53	56	60	64	67	70	73	76	79	82	85	88	91	93	96	74
$R_{F2,d}$	57	58	60	62	64	67	70	73	75	78	80	83	86	88	90	92	76
$R_{F2,f2}$	60	61	63	64	66	69	72	75	78	81	83	86	88	91	93	96	78
$R_{F3,d}$	50	52	54	58	61	64	67	69	72	75	77	80	83	85	87	89	72
$R_{F3,f3}$	49	52	54	59	62	65	68	71	74	77	80	82	85	88	90	93	72
$R_{F4,d}$	50	52	54	58	61	64	67	69	72	75	77	80	83	85	87	89	72
$R_{F4,f4}$	49	52	54	59	62	65	68	71	74	77	80	82	85	88	90	93	72
$R' = -10 \lg \left(10^{-\frac{R_{Dd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\frac{R_{Ff}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{Df}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{Fd}}{10}} \right)$	39	41	43	46	48	51	54	57	59	62	64	67	70	72	74	75	59
D_{nT} (dB) (ver Equação 84)	38	40	42	45	47	50	53	56	58	61	63	66	69	71	73	74	
$D_{nT,w}$ (dB)	58																

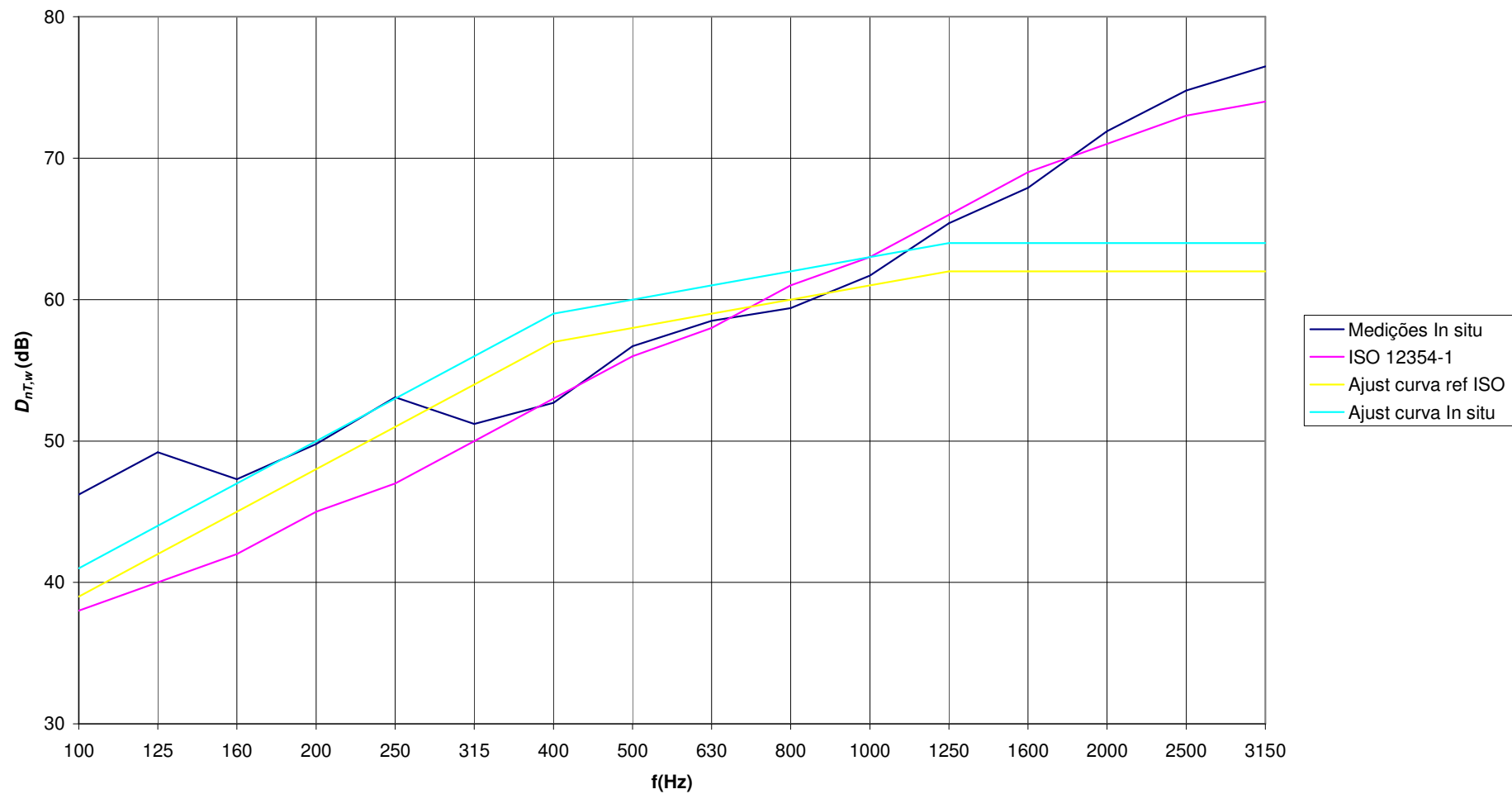


Figura 7.2 Compartimentos de igual dimensão com transmissão marginal relevante – Modelo detalhado – R'_w

Tabela 7.2 Compartimentos de igual dimensão com transmissão marginal relevante – Modelo simplificado – R'_w

	Elemento	m' kg/m ²	Rw dB	m's/m'f	M = log(m's/m'f)	Tipo ligação	KFf	KFd	KDf
Elemento Separação	S	552	61						
Parede Esquerda	F1	202.5	44	2.73	0.44	Cruz	17.2	9.8	9.8
Parede Direita	F2	270	49	2.04	0.31	Cruz	14.6	9.2	9.2
Parede Frontal	F3	202.5	44	2.73	0.44	Cruz	17.2	9.8	9.8
Parede Tardoz	F4	202.5	44	2.73	0.44	Cruz	17.2	9.8	9.8
Parede Esquerda	f1	202.5	44	2.73	0.44	Cruz	17.2	9.8	9.8
Parede Direita	f2	270	49	2.04	0.31	Cruz	14.6	9.2	9.2
Pavimento	f3	202.5	44	2.73	0.44	Cruz	17.2	9.8	9.8
Tecto	f4	202.5	44	2.73	0.44	Cruz	9.8	17.2	17.2

Tabela 7.3 Compartimentos de igual dimensão com transmissão marginal relevante – Modelo simplificado – R'_w

		Tamanho da junção $l_k(m)$	$10\lg(Ss/l_k)$	$R_{ij,w}$ dB	ΔR_w dB	$R_{ij,w} + \Delta R_w$ dB
S	Dd			61	0	61
	Df1	3.5	6.4	69	0	69
	Df2	3.5	6.4	71	0	71
	Df3	4.4	5.4	68	0	68
	Df4	4.4	5.4	68	0	68
F1	F1d	3.5	6.4	69	0	69
	F1f1	3.5	6.4	68	0	68
F2	F2d	3.5	6.4	71	0	71
	F2f2	3.5	6.4	70	0	70
F3	F3d	4.4	5.4	68	0	68
	F3f3	4.4	5.4	67	0	67
F4	F4d	4.4	5.4	68	0	68
	F4f4	4.4	5.4	60	0	60

$$R'_w = -10\lg \left(10^{-\frac{R_{w,Dd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Ff}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Df}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Fd}}{10}} \right) = 54dB$$

$$R'_w + \Delta R_w = 54dB$$

Tabela 7.4 Compartimentos de igual dimensão com transmissão marginal relevante – $D_{nT,w}$

Metodologia aplicada	$D_{nT,w}$ (dB)
Modelo detalhado (valor obtido por aplicação da Equação 66)	58
Modelo simplificado (valor obtido por aplicação da Equação 66)	54
Medições in situ	60

7.2. COMPARTIMENTOS DE IGUAL DIMENSÃO - TRANSMISSÃO MARGINAL DESPREZÁVEL

No sentido de analisar a influência, na transmissão marginal, da relação entre a massa superficial do elemento de separação e as massas superficiais dos elementos marginais, considerou-se de novo a configuração de compartimentos apresentada no ponto anterior (ver Figura 7.1) alterando apenas as massas dos elementos constituintes dos compartimentos. Assim, neste segundo exemplo (exemplo idealizado, não real), o elemento de separação entre compartimentos passa a ser o elemento mais “fraco” em termos de isolamento sonoro. Verifica-se que esta alteração faz com que a transmissão marginal diminua consideravelmente passando a ser desprezável. A razão pela qual a transmissão marginal diminui consideravelmente está associada ao facto de, naturalmente, a transmissão sonora por via directa passar a ser muito superior do que a transmissão sonora por via marginal.

A Tabela 7.5 apresenta os resultados obtidos com o modelo detalhado. Já a Tabela 7.6 Tabela 7.7 apresentam os resultados obtidos com o modelo simplificado.

Verifica-se (ver Tabela 7.5 e Tabela 7.7) que a transmissão marginal é muito diminuta quando comparada com a transmissão por via directa. De facto, quando considerado o modelo detalhado, o isolamento sonoro conferido pelo sistema total (elemento de separação + elementos marginais) difere em apenas 1 dB relativamente ao isolamento sonoro conferido pelo elemento de separação isolado. Já quando considerado o modelo simplificado, verifica-se que essa diferença é ainda mais reduzida.

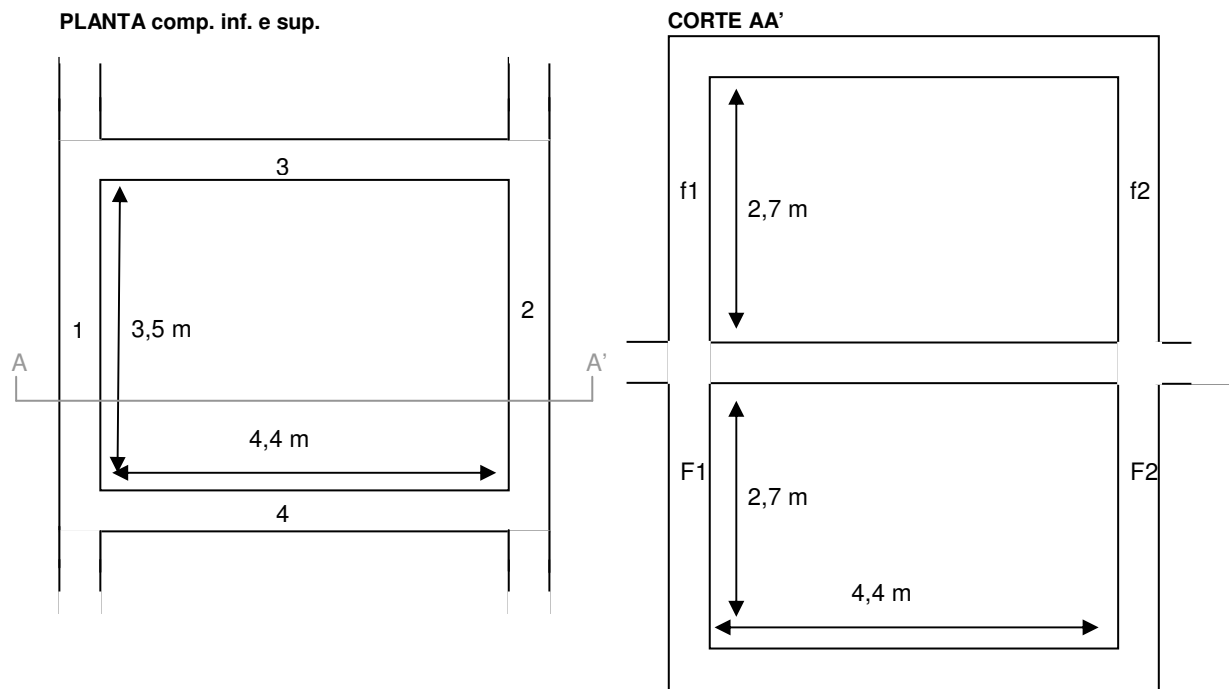


Figura 7.3 Compartimentos de igual dimensão, com transmissão marginal desprezável – caso de estudo (Figura sem escala).

Legenda:

Elemento de separação:

S Tecto/Pavimento: 4,4 m x 3,5 m = 15,4 m²; Tijolo cerâmico furado com 11 cm de espessura e 148,5 kg/m²

Elementos marginais:

F1 Parede interior: 3,5 m x 2,7 m = 9,45 m²; ligação rígida em X; Betão com 24 cm de espessura e 552 kg/m²

F2 Fachada: 3,5 m x 2,7 m = 9,45 m²; ligação em X; Betão com 24 cm de espessura e 552 kg/m²

F3 Parede frontal: 4,4 m x 2,7 m = 11,88 m²; ligação em X; Betão com 24 cm de espessura e 552 kg/m²

F4 Parede tardoz: 4,4 m x 2,7 m = 11,88 m²; ligação em X; Betão com 24 cm de espessura e 552 kg/m²

- f1 Parede interior: 3,5 m x 2,7 m = 9,45 m²; ligação rígida em X; Betão com 24 cm de espessura e 552 kg/m²
- f2 Fachada: 3,5 m x 2,7 m = 9,45 m²; ligação em X; Betão com 24 cm de espessura e 552 kg/m²
- f3 Parede frontal: 4.4 m x 2.7 m = 11,88 m²; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 15 cm de espessura e 202 kg/m²
- f4 Parede tardoz: 4.4 m x 2.7 m = 11,88 m²; ligação em X; Betão com 24 cm de espessura e 552 kg/m²

Tabela 7.5 Compartimentos de igual dimensão, com transmissão marginal relevante – Modelo detalhado – R'_w

	$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \lg \left(\frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \right)$																
f(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	Rw
R_s	20	22	24	27	31	35	39	42	45	48	50	53	56	58	61	64	42
$R_{D,d}$	20	22	24	27	31	34	38	41	44	47	50	52	55	58	60	63	42
$R_{D,f1}$	42	47	49	51	54	57	61	64	66	69	72	75	78	80	83	85	65
$R_{D,f2}$	42	44	46	48	51	55	58	61	64	67	70	73	76	79	81	83	63
$R_{D,f3}$	41	42	44	47	50	54	57	60	63	66	69	72	75	77	80	82	62
$R_{D,f4}$	41	42	44	47	50	54	57	60	63	66	69	72	75	77	80	82	62
$R_{F1,d}$	42	47	49	51	54	57	61	64	66	69	72	75	78	80	83	85	65
$R_{F1,f1}$	41	49	50	52	54	57	60	62	65	68	70	72	75	77	79	81	65
$R_{F2,d}$	42	44	46	48	51	55	58	61	64	67	70	73	76	79	81	83	63
$R_{F2,f2}$	41	43	44	46	49	52	55	57	60	63	65	68	71	73	76	77	60
$R_{F3,d}$	41	42	44	47	50	54	57	60	63	66	69	72	75	77	80	82	62
$R_{F3,f3}$	39	41	43	44	47	50	53	56	59	62	64	67	70	72	75	76	59
$R_{F4,d}$	41	42	44	47	50	54	57	60	63	66	69	72	75	77	80	82	62
$R_{F4,f4}$	39	41	43	44	47	50	53	56	59	62	64	67	70	72	75	76	59
$R' = -10 \lg \left(10^{-\frac{R_{Dd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\frac{R_{Ff}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{Df}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{Fd}}{10}} \right)$	20	22	24	27	30	33	37	40	43	46	49	51	54	57	59	62	41
D_{nT} (dB) (ver Equação 84)	19	21	23	26	29	32	36	39	42	45	48	50	53	56	58	61	
$D_{nT,w}$ (dB)	40																

Tabela 7.6 Compartimentos de igual dimensão, com transmissão marginal desprezável – Modelo simplificado – R'_w

	Elemento	m' kg/m ²	Rw dB	m's/m'f	M = log(m's/m'f)	Tipo ligação	KFf	KFd	KDf
Elemento Separação	S	148.5	44						
Parede Esquerda	F1	552	61	0.27	-0.57	Cruz	0.8	10.6	10.6
Parede Direita	F2	552	61	0.27	-0.57	Cruz	0.8	10.6	10.6
Parede Frontal	F3	552	61	0.27	-0.57	Cruz	0.8	10.6	10.6
Parede Tardoz	F4	552	61	0.27	-0.57	Cruz	0.8	10.6	10.6
Parede Esquerda	f1	552	61	0.27	-0.57	Cruz	0.8	10.6	10.6
Parede Direita	f2	552	61	0.27	-0.57	Cruz	0.8	10.6	10.6
Pavimento	f3	552	61	0.27	-0.57	Cruz	0.8	10.6	10.6
Tecto	f4	552	61	0.27	-0.57	Cruz	10.6	0.8	0.8

Tabela 7.7 Compartimentos de igual dimensão, com transmissão marginal desprezável – Modelo simplificado – R'_w

		Tamanho da junção $l_k(m)$	$10\lg(Ss/l_k)$	$R_{ij,w}$ dB	ΔR_w dB	$R_{ij,w} + \Delta R_w$ dB
S	Dd			44	0	44
	Df1	3.5	6.4	70	0	70
	Df2	3.5	6.4	70	0	70
	Df3	4.4	5.4	69	0	69
	Df4	4.4	5.4	69	0	69
F1	F1d	3.5	6.4	70	0	70
	F1f1	3.5	6.4	68	0	68
F2	F2d	3.5	6.4	70	0	70
	F2f2	3.5	6.4	68	0	68
F3	F3d	4.4	5.4	69	0	69
	F3f3	4.4	5.4	67	0	67
F4	F4d	4.4	5.4	69	0	69
	F4f4	4.4	5.4	77	0	77

$$R'_w = -10\lg \left(10^{-\frac{R_{w,Dd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Ff}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Df}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Fd}}{10}} \right) = 54dB$$

$$R'_w + \Delta R_w = 54dB$$

7.3. COMPARTIMENTOS DE IGUAL DIMENSÃO - ELEMENTO DE SEPARAÇÃO DUPLO

As folhas de cálculo com o modelo detalhado e com o modelo simplificado foram aplicadas para o cálculo do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre dois compartimentos totalmente sobrepostos separados por um elemento de separação duplo (existência de um tecto falso isolante sonoro no compartimento inferior) – ver Figura 7.4.

O cálculo do acréscimo de isolamento sonoro conferido pelo tecto falso isolante sonoro foi efectuado de acordo com a metodologia constante do ponto 5.2 - metodologia que apenas permite o cálculo de valores ponderados não permitindo portanto a obtenção da variação do isolamento sonoro em função da frequência de excitação. Como tal o valor final de isolamento sonoro obtido pelo método detalhado foi apenas comparado com o índice de isolamento sonoro, $D_{nT,w}$, obtido nas medições *in situ*.

A Tabela 7.8 apresenta os resultados obtidos com o modelo detalhado. Já a Tabela 7.9 e a Tabela 7.10 apresentam os resultados obtidos com o modelo simplificado.

A Tabela 7.11 apresenta os valores de $D_{nT,w}$ obtidos por aplicação dos modelos detalhado e simplificado e o respectivo valor obtido experimentalmente. Verifica-se que os resultados obtidos por modelação revelaram uma excelente correlação com os resultados obtidos experimentalmente.

Verifica-se (ver Tabela 7.8 e Tabela 7.10) que os encaminhamentos marginais que contêm os elementos 3 e 4 (Figura 7.4) são os encaminhamentos mais relevantes para transmissão marginal. Estes encaminhamentos contribuem para a diminuição do isolamento sonoro conferido pelo sistema total (elemento de separação + elementos marginais) em cerca de 4-5 dB relativamente ao isolamento sonoro conferido pelo elemento de separação isolado. Esta relevância e influência são facilmente compreensíveis pois verifica-se que os elementos 3 e 4 são os elementos mais “fracos” do sistema (elementos com menor massa superficial).

Verificou-se uma excelente correlação entre o valor único, $D_{nT,w}$, obtido experimentalmente e os valores únicos obtidos por modelação (ver Tabela 7.11).

É possível ainda verificar que, apesar dos elementos F1 e F2 terem a mesma constituição e dimensão, o simples facto dos elementos apresentarem tipos de ligação ao elemento de separação diferentes (o elemento F1 apresenta uma ligação do tipo cruz já o elemento F2 apresenta uma ligação do tipo T), faz com que os isolamentos sonoros $R_{D,F1}$ e $R_{D,F2}$ sejam diferentes. Verifica-se que a ligação com menos caminhos de transmissão sonora (ligação em T) compromete mais o isolamento sonoro do que a ligação com mais caminhos de transmissão sonora (ligação em cruz). Este facto é facilmente compreendido se pensarmos que a energia sonora no primeiro caso é transmitida para menos caminhos do que no segundo caso, fazendo com que no primeiro caso haja mais energia por caminho de transmissão sonora do que no segundo caso.

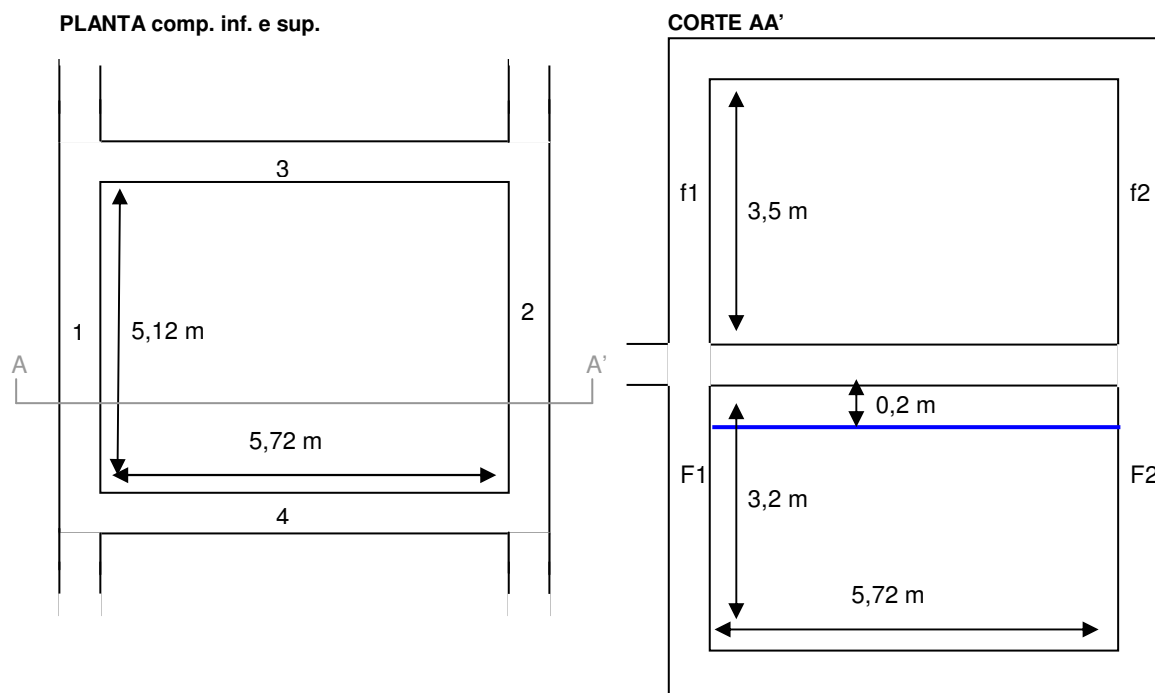


Figura 7.4 Compartimentos de igual dimensão, elemento de separação duplo – (Figura sem escala).

Legenda:

— Tecto falso isolante sonoro (caixa de ar com 20 cm de espessura)

Elemento de separação:

S Tecto/Pavimento: 5,72 m x 5,12 m = 29,29 m²; Betão com 17 cm de espessura e 391 kg/m²

Elementos marginais:

- F1 Parede interior: 5,12 m x 3,2 m = 16,38 m²; ligação rígida em X; Tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura e 270 kg/m²
- F2 Fachada: 5,12 m x 3,2 m = 16,38 m²; ligação em T; Tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura e 270 kg/m²
- F3 Parede frontal: 5,72 m x 3,2 m = 18,3 m²; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 11 cm de espessura e 148,5 kg/m²
- F4 Tecto: 5,72 m x 3,2 m = 18,3 m²; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 11 cm de espessura e 148,5 kg/m²
- f1 Parede interior: 5,12 m x 3,5 m = 17,92 m²; ligação rígida em X; Tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura e 270 kg/m²
- f2 Fachada: 5,12 m x 3,5 m = 17,92 m²; ligação em T; Tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura e 270 kg/m²
- f3 Parede frontal: 5,72 m x 3,5 m = 20,02 m²; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 11 cm de espessura e 148,5 kg/m²
- f4 Parede tardoz: 5,72 m x 3,5 m = 20,02 m²; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 11 cm de espessura e 148,5 kg/m²

Tabela 7.8 Compartimentos de igual dimensão, elemento de separação duplo – Modelo detalhado – R'_w

$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10\lg\left(\frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}}\right)$																			
	f(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	Rw	$R_W + \Delta R_W$
$R_{D,d}$		32	35	39	43	46	49	52	55	57	60	62	65	67	70	72	74	56	62.5
$R_{D,f1}$		46	50	55	58	61	65	68	70	73	76	79	81	84	87	89	92	71	77.5
$R_{D,f2}$		44	47	52	55	58	61	64	67	70	72	75	77	80	83	85	87	68	74.5
$R_{D,f3}$		43	45	48	52	55	58	62	65	67	70	73	76	79	81	84	86	66	72.5
$R_{D,f4}$		43	45	48	52	55	58	62	65	67	70	73	76	79	81	84	86	66	72.5
$R_{F1,d}$		46	50	55	58	61	65	68	70	73	76	79	81	84	87	89	92	71	77.5
$R_{F1,f1}$		49	53	58	61	64	67	71	74	76	79	82	85	88	91	93	96	74	74
$R_{F2,d}$		44	47	52	55	58	61	64	67	70	72	75	77	80	83	85	87	68	74.5
$R_{F2,f2}$		47	50	54	57	60	63	66	69	72	75	77	80	82	85	87	90	71	71
$R_{F3,d}$		43	45	48	52	55	58	62	65	67	70	73	76	79	81	84	86	66	72.5
$R_{F3,f3}$		45	47	49	52	55	59	63	66	69	72	75	78	81	83	86	89	67	67
$R_{F4,d}$		43	45	48	52	55	58	62	65	67	70	73	76	79	81	84	86	66	72.5
$R_{F4,f4}$		45	47	49	52	55	59	63	66	69	72	75	78	81	83	86	89	67	67
$R' = -10\lg\left(10^{\frac{R_{Dd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{R_{Ff}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{\frac{R_{Df}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{R_{Fd}}{10}}\right)$		30	33	36	40	43	46	49	52	55	58	60	63	65	68	70	72	53	59
R'_W (dB)		53																	
$\Delta R'_W$ (dB) (ver ponto 5.2)		6,5																	
$R'_W + \Delta R'_W$ (dB)		59																	

Tabela 7.9 Compartimentos de igual dimensão, elemento de separação duplo – Modelo simplificado – R'_w

	Elemento	m' kg/m ²	Rw dB	m's/m'f	M = log(m's/m'f)	Tipo ligação	KFf	KFd	KDf
Elemento Separação	S	391	55						
Parede Esquerda	F1	270	49	1.45	0.16	Cruz	11.6	8.8	8.8
Parede Direita	F2	270	49	1.45	0.16	T	8.1	5.8	5.8
Pavimento	F3	148.5	44	2.63	0.42	Cruz	16.9	9.7	9.7
Tecto	F4	148.5	44	2.63	0.42	Cruz	16.9	9.7	9.7
Parede Esquerda	f1	270	49	1.45	0.16	Cruz	11.6	8.8	8.8
Parede Direita	f2	270	49	1.45	0.16	T	8.1	5.8	5.8
Pavimento	f3	148.5	44	2.63	0.42	Cruz	16.9	9.7	9.7
Tecto	f4	148.5	44	2.63	0.42	Cruz	16.9	9.7	9.7

Tabela 7.10 Compartimentos de igual dimensão, elemento de separação duplo – Modelo simplificado – R'_w

		Tamanho da junção $l_k(m)$	$10\lg(Ss/l_k)$	R_{ij} dB	ΔR_w dB	$R_{ij} + \Delta R_w$ dB
S	Dd			55	7.4	63
	Df1	5.12	7.6	69	7.4	76
	Df2	5.12	7.6	66	7.4	73
	Df3	5.73	7.1	67	7.4	74
	Df4	5.73	7.1	67	7.4	74
F1	F1d	5.12	7.6	69	7.4	76
	F1f1	5.12	7.6	68	0	68
F2	F2d	5.12	7.6	66	7.4	73
	F2f2	5.12	7.6	65	0	65
F3	F3d	5.73	7.1	67	7.4	74
	F3f3	5.73	7.1	68	0	68
F4	F4d	5.73	7.1	67	7.4	74
	F4f4	5.73	7.1	68	0	68

$$R'_w = -10\lg \left(10^{-\frac{R_{w,Dd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Ff}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Df}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Fd}}{10}} \right) = 53dB$$

$$R'_w + \Delta R_w = 58dB$$

Tabela 7.11 Compartimentos de igual dimensão, elemento de separação duplo – $D_{nT,w}$

Metodologia aplicada	$D_{nT,w}$ (dB)
Modelo detalhado (valor obtido por aplicação da Equação 66)	59
Modelo simplificado (valor obtido por aplicação da Equação 66)	58
Medições <i>in situ</i>	59

7.4. COMPARTIMENTOS DE DIMENSÃO DIFERENTE - PARCIALMENTE SOBREPOSTOS

Como referido anteriormente os modelos de cálculo apresentados nos pontos anteriores aplicam-se apenas a compartimentos adjacentes ou sobrepostos.

O exemplo de aplicação apresentado no presente ponto tem o objectivo de testar a aplicação dos modelos de cálculo a compartimentos apenas parcialmente sobrepostos.

Para tal consideraram-se dois compartimentos de dimensões diferentes, parcialmente sobrepostos e separados por um elemento simples. O elemento de separação entre os dois compartimentos corresponde apenas a parte do tecto do compartimento inferior. De forma a adaptar os modelos de cálculo a este exemplo, a parte restante da cobertura do compartimento inferior foi considerada como um elemento de transmissão marginal, no presente caso elemento marginal F4 (ver Figura 7.5).

Verificou-se uma excelente correlação entre o valor único, $D_{nT,w}$, obtido experimentalmente e os valores únicos obtidos por modelação.

Relativamente aos valores de D_{nT} em função da frequência, verificou-se uma diferença considerável entre os valores obtidos experimentalmente e os valores obtidos por modelação (10 dB em algumas bandas de frequência). Esta diferença pode estar relacionada com o facto do exemplo considerado sair um pouco fora do âmbito de aplicação dos modelos, ou seja, com o facto dos compartimentos não estarem completamente sobrepostos.

A Tabela 7.12 apresenta os resultados obtidos com o modelo detalhado. A Figura 7.6 apresenta os valores de D_{nT} em função da frequência obtidos experimentalmente e por modelação (modelo detalhado). Já a Tabela 7.13 e a Tabela 7.14 apresentam os resultados obtidos com o modelo simplificado.

A Tabela 7.14 apresenta os valores de $D_{nT,w}$ obtidos por aplicação dos modelos detalhado e simplificado e o respectivo valor obtido experimentalmente. Verifica-se que os resultados obtidos por modelação revelaram uma excelente correlação com os resultados obtidos experimentalmente.

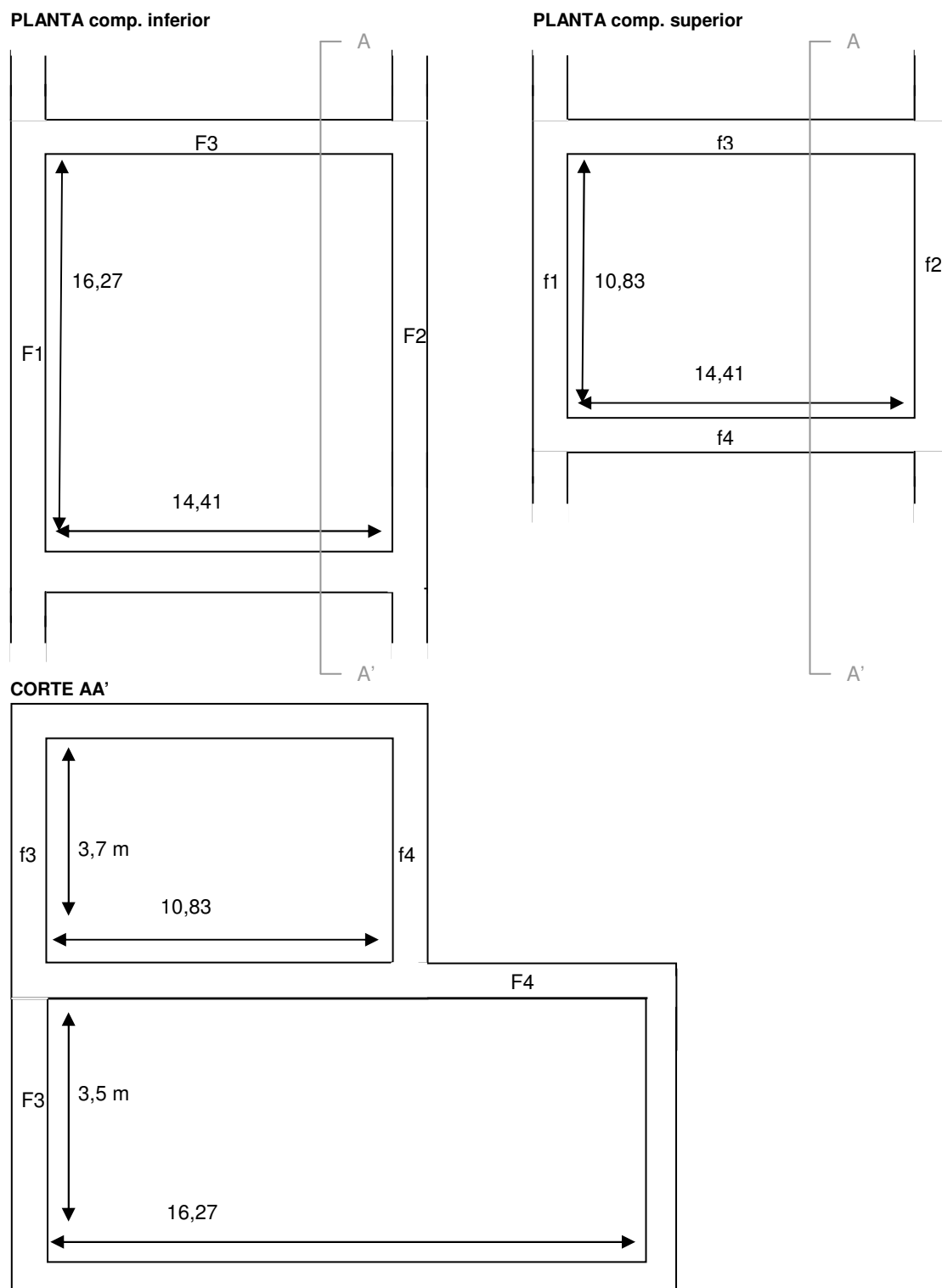


Figura 7.5 Compartimentos de dimensão diferente – caso de estudo (Figura sem escala).

Legenda:

Elemento de separação:

S Tecto/Pavimento: $14,41 \times 10,83 \text{ m} = 156,06 \text{ m}^2$; Betão com 17 cm de espessura e 391 kg/m^2

Elementos marginais:

- F1 Fachada: $16,27 \text{ m} \times 3,5 \text{ m} = 59,9 \text{ m}^2$; ligação rígida em T; Tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura e 270 kg/m^2
- F2 Parede direita: $16,27 \text{ m} \times 3,5 \text{ m} = 59,9 \text{ m}^2$; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura e 270 kg/m^2
- F3 Parede frontal: $14,41 \text{ m} \times 3,5 \text{ m} = 50,4 \text{ m}^2$; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 25 cm de espessura e $337,5 \text{ kg/m}^2$
- F4 Tecto: $14,41 \text{ m} \times 5,4 \text{ m} = 78,4 \text{ m}^2$; ligação em T; Betão com 17 cm de espessura e 391 kg/m^2
- f1 Fachada: $10,83 \text{ m} \times 3,7 \text{ m} = 194,1 \text{ m}^2$; ligação rígida em T; Tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura e 270 kg/m^2
- f2 Parede direita: $10,83 \text{ m} \times 3,7 \text{ m} = 194,1 \text{ m}^2$; ligação rígida em X; Tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura e 270 kg/m^2
- f3 Parede frontal: $14,41 \text{ m} \times 3,7 \text{ m} = 53,3 \text{ m}^2$; ligação em X; Tijolo cerâmico furado com 25 cm de espessura e $337,5 \text{ kg/m}^2$
- f4 Parede tardoz: $14,41 \text{ m} \times 3,7 \text{ m} = 53,3 \text{ m}^2$; ligação rígida em X; Tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura e 270 kg/m^2

Tabela 7.12 Compartimentos de dimensão diferente – Modelo detalhado – R'_w

	$R_{ij} = \frac{R_{i,situ}}{2} + \Delta R_{i,situ} + \frac{R_{j,situ}}{2} + \Delta R_{j,situ} + \overline{D_{v,ij,situ}} + 10 \lg \left(\frac{S_s}{\sqrt{S_i S_j}} \right)$																	
	f(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	Rw
$R_{D,d}$		31	35	39	43	46	49	52	54	57	60	62	65	68	70	72	74	56
$R_{D,f1}$		45	50	54	58	61	64	68	70	73	76	79	82	85	88	90	93	71
$R_{D,f2}$		47	51	55	58	61	65	68	71	74	77	79	82	85	88	90	93	72
$R_{D,f3}$		48	52	55	59	62	65	68	71	74	77	80	82	85	88	90	92	72
$R_{D,f4}$		46	49	53	57	60	63	66	69	72	75	77	80	83	86	88	91	70
$R_{F1,d}$		45	50	54	58	61	64	68	70	73	76	79	82	85	88	90	93	71
$R_{F1,f1}$		50	56	61	64	67	71	74	77	80	83	86	89	92	94	97	100	77
$R_{F2,d}$		47	51	55	58	61	65	68	71	74	77	79	82	85	88	90	93	72
$R_{F2,f2}$		52	55	59	62	66	69	72	75	78	81	84	86	89	92	95	97	76
$R_{F3,d}$		48	52	55	59	62	65	68	71	74	77	80	82	85	88	90	92	72
$R_{F3,f3}$		51	55	59	62	65	68	72	74	77	80	83	86	88	91	94	94	76
$R_{F4,d}$		43	47	51	54	57	61	64	67	69	72	75	78	81	83	86	88	68
$R_{F4,f4}$		44	47	51	55	58	61	64	67	70	73	76	78	81	84	86	89	68
$R' = -10 \lg \left(10^{\frac{R_{Dd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{R_{Ff}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{\frac{R_{Df}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{\frac{R_{Fd}}{10}} \right)$		30	34	38	42	45	48	51	53	56	59	61	64	67	69	71	73	55
R'_w (dB)		55																

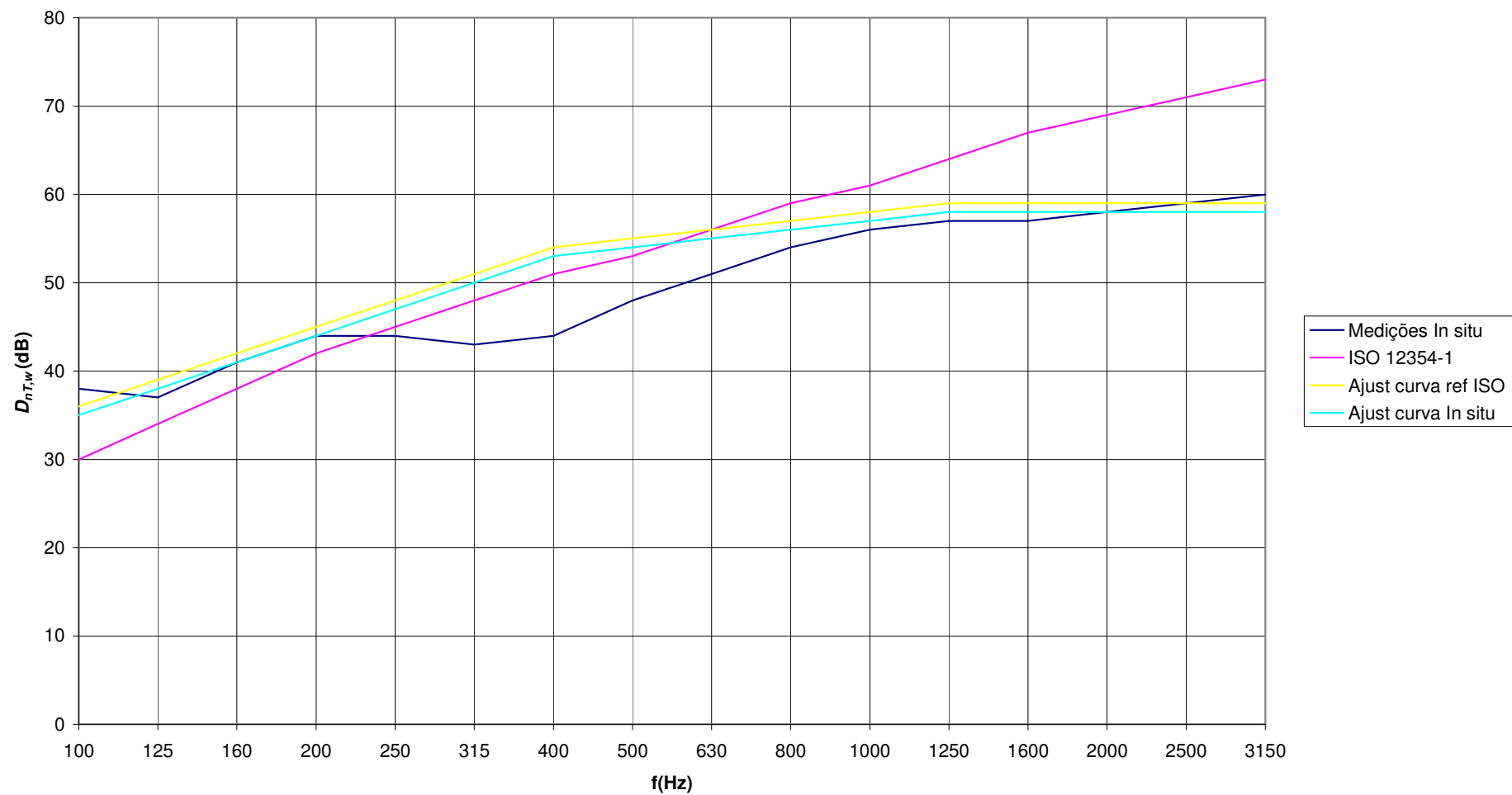


Figura 7.6 Compartimentos de dimensão diferente – caso de estudo (Figura sem escala).

Tabela 7.13 Compartimentos de dimensão diferente – Modelo detalhado – R'_w

	Elemento	m' kg/m ²	Rw dB	m's/m'f	M = log(m's/m'f)	Tipo ligação	KFf	KFd	KDf
Elemento Separação	S	391	55						
Parede Esquerda	F1	270	49	1.45	0.16	T	8.1	5.8	5.8
Parede Direita	F2	270	49	1.45	0.16	Cruz	11.6	8.8	8.8
Parede Frontal	F3	337.5	53	1.16	0.06	Cruz	9.8	8.7	8.7
Parede Tardoz	F4	391	55	1.00	0.00	T	5.7	5.7	5.7
Parede Esquerda	f1	270	49	1.45	0.16	T	8.1	5.8	5.8
Parede Direita	f2	270	49	1.45	0.16	Cruz	11.6	8.8	8.8
Pavimento	f3	337.5	53	1.16	0.06	Cruz	9.8	8.7	8.7
Tecto	f4	270	49	1.45	0.16	T	5.8	8.1	8.1

Tabela 7.14 Compartimentos de dimensão diferente – Modelo detalhado – R'_w

		Tamanho da junção $l_k(m)$	$10\lg(Ss/l_k)$	$R_{ij,w}$ dB	ΔR_w dB	$R_{ij,w} + \Delta R_w$ dB
S	Dd			55	0	55
	Df1	10.83	11.6	70	0	70
	Df2	10.83	11.6	73	0	73
	Df3	14.41	10.3	73	0	73
	Df4	10.83	11.6	72	0	72
F1	F1d	10.83	11.6	70	0	70
	F1f1	10.83	11.6	69	0	69
F2	F2d	10.83	11.6	73	0	73
	F2f2	10.83	11.6	72	0	72
F3	F3d	14.41	10.3	73	0	73
	F3f3	14.41	10.3	73	0	73
F4	F4d	10.83	11.6	72	0	72
	F4f4	14.41	10.3	68	0	68

$$R'_w = -10\lg \left(10^{-\frac{R_{w,Dd}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Ff}}{10}} + \sum_{f=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Df}}{10}} + \sum_{F=1}^n 10^{-\frac{R_{w,Fd}}{10}} \right) = 54dB$$

$$R'_w + \Delta R_w = 54dB$$

Tabela 7.15 Compartimentos de dimensão diferente – $D_{nT,w}$

Metodologia aplicada	$D_{nT,w}$ (dB)
Modelo detalhado (valor obtido por aplicação da Equação 66)	55
Modelo simplificado (valor obtido por aplicação da Equação 66)	54
Medições in situ	53

CONCLUSÕES

O estudo do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos permitiu identificar dois processos de transmissão sonora: i) transmissão directa (transmissão sonora que ocorre através do elemento de separação) e ii) transmissão marginal (transmissão sonora que ocorre através dos elementos marginais ao elemento de separação).

Este estudo permitiu enunciar as equações gerais por detrás dos modelos de cálculo normalizados que são utilizados no cálculo do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos, modelo detalhado e modelo simplificado.

Com base nessas equações foram construídas folhas de cálculo de forma a tornar expedita a aplicação dos modelos a casos reais. Estas folhas foram preparadas de modo a permitir a obtenção dos dados de base dos modelos a partir das equações apresentadas no ponto 5. A folha de cálculo com o modelo detalhado contempla uma base de dados com informação acerca das propriedades físicas de diversos materiais construtivos (módulo de *Young*, coeficiente de *Poisson*, densidade, factor de perdas internas – ver Anexo A.1). O código utilizado permite que sejam acrescentados e/ou actualizados elementos desta base de dados de uma forma simples e directa sem implicar a modificação das expressões matemáticas base.

Relativamente à estrutura, ambas as folhas de cálculo apresentam:

1. Uma secção de introdução de dados, para introdução dos dados relativos ao caso em estudo, como por exemplo: constituição e dimensão dos diferentes elementos do compartimento emissor e do compartimento receptor (elemento de separação e elementos marginais); tipo e dimensão da ligação entre os diferentes elementos marginais e o elemento de separação; definição da tipologia do elemento de separação (simples ou duplo).
2. Uma secção de cálculo onde, tendo em conta as expressões apresentadas nos pontos Modelos de cálculo de r^4 e 5 e os dados introduzidos na secção de introdução de dados, são efectuados todos os cálculos necessários para obtenção do valor do isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos.

3. Uma secção de apresentação de resultados, onde são apresentados os resultados obtidos como por exemplo: modelo detalhado - índices R_S , R_{ij} , $R_{S,w}$, $R_{ij,w}$, R' , R'_w , D_{nT} e $D_{nT,w}$; modelo simplificado – índices $R_{S,w}$, $R_{ij,w}$, R'_w e $D_{nT,w}$.

Os resultados obtidos pelas folhas de cálculo foram validados, utilizando para tal o exemplo de cálculo apresentado no Anexo H da ISO 12354-1. É de referir que no processo de validação da folha de cálculo do modelo simplificado foram encontrados alguns erros no exemplo considerado pela ISO 12354-1. Esses erros foram apresentados no ponto 6.2.

Na aplicação dos modelos a casos reais verificou-se que a transmissão marginal pode ser determinante na diminuição do isolamento sonoro conferido pelo sistema total (elemento de separação + elementos marginais).

Conclui-se que o valor dessa contribuição depende essencialmente de: i) tipo de ligação entre os elementos marginais e o elemento de separação; ii) da relação entre as massas dos elementos marginais e a massa do elemento de separação.

Em relação ao tipo de ligação entre os elementos marginais e o elemento de separação, conclui-se que as ligações com menos caminhos de transmissão sonora, como por exemplo as ligações em canto ou em T, comprometem mais o isolamento sonoro total do sistema do que as ligações com mais caminhos de transmissão sonora como seja o caso da ligação em cruz (ver .

Relativamente à relação entre as massas dos elementos marginais e a massa do elemento de separação apresentou-se, por exemplo no ponto 7.1, um caso em que a transmissão marginal é relevante para o isolamento global conferido pelo sistema. Neste exemplo os elementos marginais apresentam uma massa superficial bastante inferior à massa superficial do elemento de separação (elementos marginais são os elementos mais fracos em termos de isolamento sonoro). Ainda neste exemplo, verificou-se que os valores de D_{nT} em função da frequência obtidos pelo modelo detalhado se aproximam bastante, para a generalidade das bandas de frequência analisadas, dos valores experimentais medidos *in situ*. As maiores diferenças encontradas ocorrem nas baixas frequências, tendo-se concluído que estão relacionadas com o facto de não ser adequado utilizar-se modelos estatísticos nestas bandas de frequência. Verificou-se que o valor único de $D_{nT,w}$ calculado

pelo modelo detalhado se aproxima bastante do valor medido *in situ*. verificou-se ainda que o modelo simplificado apresentou um valor um pouco mais conservativo relativamente ao valor experimental (cerca de 6 dB inferior).

No ponto 7.2 apresentou-se um exemplo contrário ao exemplo apresentado no ponto 7.1, ou seja um exemplo em que o elemento mais fraco em termos de isolamento sonoro é o elemento de separação. Verificou-se que, como esperado, para este caso a transmissão marginal deixou de ter significado.

No ponto 7.3 testaram-se os modelos de cálculo numa situação em que o elemento de separação é do tipo duplo. Verificou-se que o valor único de $D_{nT,w}$ calculado pelos dois modelos se aproxima bastante do valor medido *in situ*.

Testaram-se ainda os modelos de cálculo a compartimentos apenas parcialmente sobrepostos. Verificou-se uma excelente correlação entre o valor único, $D_{nT,w}$, obtido experimentalmente e os valores únicos obtidos por modelação. Relativamente aos valores de D_{nT} em função da frequência, verificou-se uma diferença considerável entre os valores obtidos experimentalmente e os valores obtidos pelo modelo detalhado (10 dB em algumas bandas de frequência). Conclui-se que esta diferença pode estar relacionada com o facto do exemplo considerado sair fora do âmbito de aplicação dos modelos, ou seja, com o facto dos compartimentos não estarem completamente sobrepostos.

Pelos resultados alcançados (validação das folhas e aplicação a casos reais), julga-se que as folhas de cálculo desenvolvidas poderão ser utilizadas em futuros projetos de acústica de edifícios. Uma vez que na generalidade dos projetos de acústicas de edifícios a variação do isolamento sonoro com a frequência é um dado pouco relevante, a utilização do modelo simplificado parece ser a mais adequada pois: i) apenas necessita como dado de entrada a massa superficial dos elementos construtivos; ii) verificou-se na maioria dos casos analisados uma correlação bastante boa entre os valores calculados por este modelo e os valores medidos e iii) verificou-se que o modelo detalhado não traz uma mais-valia significativa nestes casos (casos em que a variação do isolamento sonoro com a frequência é um dado pouco relevante).

Já nos casos em que a variação do isolamento sonoro em função da frequência tem importância, ou seja nos casos em que é necessário efetuar uma análise mais fina como por exemplo no estudo de um projeto acústico de um bar ou de uma discoteca, deverá ser utilizado o modelo detalhado.

Esta dissertação permitiu assim, através da análise aprofundada dos modelos normalizados para o cálculo do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea entre compartimentos, obter ferramentas de análise que poderão ser utilizadas pelos projectistas de acústica para: i) fundamentar as decisões tomadas em fase de projecto e ii) assegurar o cumprimento dos requisitos legais constantes do RRAE, prevenindo/evitando a eventualidade de ter de recorrer a correcções acústicas muitas vezes dispendiosas após o edifício estar concluído e ocupado.

REFERÊNCIAS

- [ref. 1]** Albano Neves e Sousa, 2009, DFA em Engenharia Acústica, Conceitos Básicos de Acústica de Edifícios, Instituto Superior Técnico, DeCivil.
- [ref. 2]** Fernando Lau, 2010, DFA em Engenharia Acústica, Fundamentos de aeroacústica – ruído aerodinâmico - Texto de Apoio, Instituto Superior Técnico.
- [ref. 3]** Beranek, L.L., 1996, Acoustics, Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, Inc.
- [ref. 4]** Beranek, L.L., Vér, I.L., 1992, Noise and vibration control engineering: principles and applications, John Wiley & Sons, EUA.
- [ref. 5]** ISO 9613:1996 – Acoustics. Attenuation of sound during propagation outdoors -- Part 2: General method of calculation
- [ref. 6]** Tor Erik Vigran, 2008, Building Acoustics, Taylor & Francis - London and New York
- [ref. 7]** EN 12354-1:2000 - Building acoustics. Estimation of acoustic performance in buildings from the performance of elements. Airborne sound insulation between rooms
- [ref. 8]** ISO 140-4:1998 – Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms
- [ref. 9]** ISO 717-1:1996 – Acoustics. Rating of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Airborne sound insulation
- [ref. 10]** Pedro Martins da Silva, Sebenta da disciplina de Acústica Aplicada, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (sebenta obtida no ano de 2003 no departamento de Física da referida faculdade).
- [ref. 11]** Pedro Martins da Silva, 1989, Elementos de Acústica Musical, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa
- [ref. 12]** ISO 140-1:1997 – Acoustics. Measurement of sound insulation in buildings and of building elements -- Part 1: Requirements for laboratory test facilities with suppressed flanking transmission

BIBLIOGRAFIA

- Carl Hopkins, 2007, Sound Insulation – First edition, Elsevier Ltd.
- F. Alton Everest, Ken C. Pohlmann, 2009, Master Handbook of Acoustics, Fifth Edition, Mc Graw Hill.
- Frank Fahy, 2001, Foundations of engineering acoustics, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, Elsevier Academic Press.
- Heinrich Kuttruff, 2009, Fifth Edition, Room Acoustics, Spon Press.
- J. David Quirt, 2011, Controlling air-borne and structure-borne sound in buildings, Noise/News International, 2011 June.
- Jorge Patrício, 2007, Acústica nos Edifícios – 4ª Edição, Verlag Dashofer.
- Jorge Patrício, 2003, Condicionamento acústico de estabelecimentos de restauração e unidades similares, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Jorge Patrício, 2004, A acústica nos edifícios, Guia para a quantificação da transmissão marginal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Michael Barron, 2000, Auditorium acoustics and architectural design, E & FN SPON.
- Pedro Martins da Silva, 2001, A componente acústica na reabilitação de edifícios de habitação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Ricardo Manuel de Abreu Dias, 2009, Análise comparativa dos métodos normalizados de previsão da transmissão sonora por via aérea, Dissertação para obtenção do Grau de Mestres em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico.

ANEXOS

A.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Material	Módulo Young	Coef. Poisson	Densidade	Fac. perdas internas
	E (GN/m ²)	ν	(kg/m ³)	η_{int}
Betão	30	0,2	2300	0,006
Tijolo cerâmico furado	16	0.3	1350	0.015
Vidro	60	0.2	2500	0.01
Argamassas e rebocos	13.7	0.2	2100	0.01
Gesso cartonado	7.7	0.4	1200	0.01
Blocos gesso	7.7	0.3	800	0.01
Alvenaria de pedra	1.19	0.2	2000	0.01
Adobe	0.35	0.2	1700	0.01
Viroc	3	0.2	1300	0.01
Calcium-silicate	12	0.2	1750	0.015